

微量 Sr 置換した RE123 溶融凝固バルクの低温における高臨界電流特性

High Critical Current Properties of Dilute Sr Doped RE123 Melt-Solidified Bulks at Low Temperatures

石井悠衣, 山崎裕也, 荻野拓, 堀井滋, 下山淳一, 岸尾光二 (東大院工)

YUI Ishii, YUHYA Yamazaki, HIRAKU Ogino, SHIGERU Horii, JUN-ICHI Shimoyama and KOHJI Kishio (The Univ. of Tokyo)

E-mail: tt077126@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp (Y. Ishii)

【はじめに】 銅酸化物超伝導体の中でも電氣的磁氣的異方性の極端に低い RE123 超伝導体は、磁場中での臨界電流特性に優れることから線材やバルクマグネット応用など様々な研究開発がこれまで進められてきた。これらの高 J_c 化については配向制御や常伝導微細粒子の添加など組織制御を中心として研究が行われており、高い臨界電流特性が達成されてきた。一方我々は精密化学組成が銅酸化物超伝導材料の臨界電流特性に与える影響について系統的に研究を進め、不純物元素の微量置換がこれらの高臨界電流特性化に対して普遍的に有効であることを示してきた[1]。RE123 溶融凝固バルクにおいては Zn, Ni などの二価金属元素が CuO_2 面を置換し有効なピンニングセンターとなる事が報告されているが[2]、本研究では RE, Ba, Cu サイトの中でもブロック層である CuO 鎖に対する微量不純物元素置換が 77 K での J_c 向上にとりわけ大きく寄与することを明らかにしてきた[3]。これらの元素置換効果は全て点欠陥的なピンニングセンターの導入によっているものと考えている。前回の報告では、最近少量の RE/Ba 置換の存在[4]が指摘される Dy123 溶融凝固バルクにおいて、RE/Ba 置換レベルの増加に加えさらに Sr を微量に置換することによって、これらが互いにピンポテンシャルを低下させることなく一層のピンニング力強化に有効であることを報告した[5]が、主に 77 K での J_c 特性しか評価していなかった。そこで今回は、Sr 置換した Dy123 溶融凝固バルクのピンニング特性について、幅広い温度領域で調べ、また Dy123 よりも RE/Ba 置換の起こりやすい Gd123 溶融凝固バルクの特性和も比較した。

【実験方法】 $\text{RE}(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x)_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (RE = Gd, Dy; $x = 0, 0.003$)、RE211 を 7 : 3 のモル比で混合し、このとき Pt を 0.5 wt% 添加した。一軸プレスよって 20 mm ϕ \times 10 mm のペレットに成型後、Nd123 単結晶を用いた cold seeding 法により空气中で溶融凝固を行った。溶融凝固時の冷却速度はいずれも 0.6°C h^{-1} とした。得られたバルク体から種結晶直下方向に 1 mm の部分を切り出し、酸素気流中でポストアニールした。超伝導特性は引き抜き法および SQUID 磁束計による磁化測定によって評価し、微細組織は SEM により観察した。

【結果と考察】 全ての組成においてシングルドメインから成る試料が得られた。400°C で 120 時間酸素アニールした後の試料の T_c は、無置換 Dy123, Sr 置換 Dy123, 無置換 Gd123 溶融凝固バルク体についてそれぞれ 92.4 K, 92.0 K, 93.7 K であった。これらの試料の 77 K における J_c - H 特性を Fig. 1 に示した。Dy123 溶融凝固バルクにおいては、無置換試料に比べ Sr 置換した試料で確かに第二ピークが大きくなっていることが分かる。これは Sr が置換した部分の周囲が点欠陥的なピンニングセンターとして働くためと考えられる。一方、無置換 Gd123 試料においては、Gd/Ba 置換に起因して Sr 置換した Dy123 試料とほぼ同程度の J_c 特性を示した。これらの試料に対し、様々な温度における J_c - H 特性を調べたところ、Sr 置換した試料では 70 K 以下の低温域でピーク効果が大きく強められることが新たにわかった。これらの試料の第二ピーク磁場における J_c を

$J_{c, \text{peak}}$ とし、これを温度に対してプロットした図が Fig. 2 である。図から明らかなように、Sr 置換 Dy123 試料では低温側で大きく $J_{c, \text{peak}}$ が増加し、77 K においてほぼ同程度の J_c を示した無置換 Gd123 試料の $J_{c, \text{peak}}$ を大きく上回った。またこれに伴い 2 T 付近における J_c も著しく上昇する傾向があった。これらの結果は、RE/Ba 置換の存在する系において、Sr 置換がとりわけ低温での J_c 向上に有効であることを意味している。講演では RE/Ba 置換の起こらない Sr 置換 Y123 単結晶のピンニング特性を含め、RE123 における微量 Sr 置換効果を総合的に議論する。

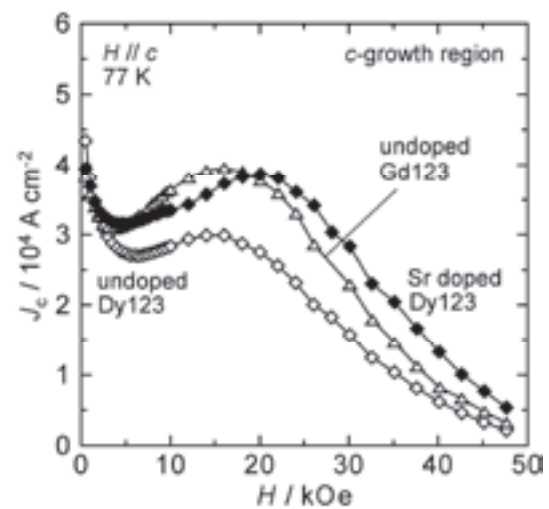


Fig. 1 J_c - H curves at 77 K for undoped and Sr doped Dy123 and undoped Gd123 melt-solidified bulks annealed in flowing oxygen at 400°C for 120 h.

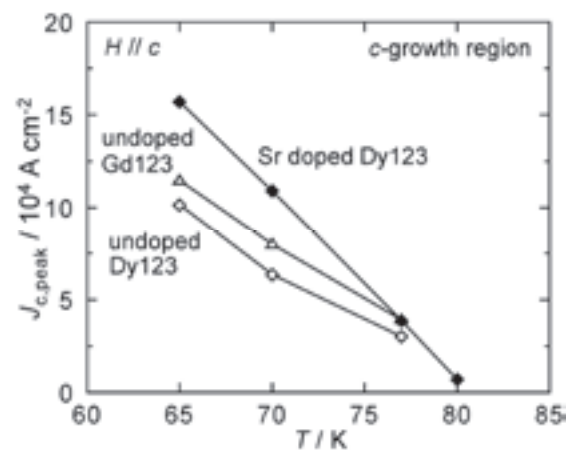


Fig. 2 Temperature dependence of $J_{c, \text{peak}}$ for undoped and Sr doped Dy123 and undoped Gd123 melt-solidified bulks annealed in flowing oxygen at 400°C for 120 h.

【参考文献】 [1] J. Shimoyama *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15**, (2005) 3778, [2] G. Krabbes *et al.*, *Physica C* **330** (2000) 181, [3] Y. Ishii *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 202514 (2006), [4] T. Nakashima *et al.*, *CryoPrague 2006 (Proceedings of ICMC '06 and 9th Cryogenics)* **Vol. 2** (2007) 109, [5] 石井ほか、2007年度秋季低温工学・超電導学会 3C-p04

強いピン止め力を有する超伝導バルクへのパルス着磁

Pulsed Field Magnetization for HTSC Bulk with Strong Pinning Force

藤代博之, 日山拓也, 三浦 崇, 内藤智之 (岩手大工), 成木紳也, 坂井直道, 平林 泉 (SRL-ISTEC)

FUJISHIRO Hiroyuki, HIYAMA Takuya, MIURA Takashi, NAITO Tomoyuki (Iwate Univ.),

NARIKI Shinya, SAKAI Naomichi, HIRABAYASHI Izumi (SRL-ISTEC)

(E-mail: fujishiro@iwate-u.ac.jp)

はじめに

超伝導バルクの疑似永久磁石への応用において、パルス着磁 (PFM) は磁場中冷却着磁 (FCM) に代わる着磁法として注目されている。従来、PFM は FCM に比べ捕捉磁場 B_T が小さい欠点があったが、着磁時の温度測定などから着磁メカニズムへの理解が進み、バルクの温度 T_s を 2 段階に変化させてパルス磁場を印加する MMPSC 法 (Modified Multi-Pulse technique with Stepwise Cooling) により、 $\phi 45$ mm Gd 系バルク B ($B_T(\text{FCM})=1.7$ T at 77 K) を用いて $B_T=5.2$ T の磁場捕捉を達成している [1]。一般に、バルク内のピン止め力 F_p (または臨界電流密度 J_c) の増加により捕捉磁場 B_T の向上が期待されるので、本研究ではバルク B よりもさらに強いピン止め力を有する SRL-ISTEC により作製された $\phi 45$ mm Gd 系バルク A ($B_T(\text{FCM})=1.8$ T at 77 K) に対するパルス着磁特性を評価し、バルク B と比較した。

実験と検討

$T_s=20-60$ K に伝導冷却したバルク A, B に、ソレノイド型パルスコイルを用いてパルス磁場 ($B_{\text{ex}}=4.0-7.7$ T) を印加した。単一パルスまたは複数回の同一パルス磁場印加のもとで、バルク表面の捕捉磁場 B_T 、温度上昇 ΔT を複数点で測定した。また MMPSC 法を用いてバルク A に対する捕捉磁場の増大を目指した。

図 1(a), (b) に、 $T_s=20$ K, 40 K に保持したバルク A, B に単一パルス磁場 B_{ex} を印加した場合のバルク中心での捕捉磁場 B_T^c 及び、最大温度上昇 ΔT_{max} をそれぞれ示す。バルク中心に磁束が捕捉され始める最低印加磁場は、バルク B では 40 K, 20 K とも 4 T であるが、ピン止め力が強いバルク A では 4 T (at 40 K) から 5 T (at 20 K) と低温化により増加する。しかし、 $T_s=20$ K での最大捕捉磁場 B_T^{max} は、バルク A において 2.8 T であるのに対して、バルク B では 3.7 T と、バルク B の方が予想に反して B_T^{max} は大きかった。図 1(b) において、バルク中心での最大温度上昇 ΔT_{max} は、バルク A, B とも、印加磁場 B_{ex} の増大とバルク温度 T_s の低温化により増大する一般的傾向を示す。低磁場印加ではバルク A の方が ΔT_{max} は小さいが、この理由はバルク A の方が磁場捕捉量が少ないために、ピン止め損失が小さいことが原因と考えられる。

図 2 にバルク A に対して $T_s=20$ K で $B_{\text{ex}}=6.93$ T のパルス磁場を印加したときの、印加磁場 $\mu_0 H_a(t)$ とバルク中心、Growth sector region (GSR) 及び Growth sector boundary (GSB) での局所磁場 $B_L(t)$ の時間依存性を示す。 B_L^c は最大 4.3 T までしか上昇せず、その後 flux jump により磁束がわずかに逃げる。局所的な温度上昇が存在するため、 B_L^{GSR} , B_L^{GSB} での磁束クリープが大きいことが分かった。また、バルク上部 0.5 mm での捕捉磁場分布の測定から、バルク A は面内のピン止め力の不均一が低温では特に顕著であり、磁場侵入経路がバルク B とは大きく異なることが分かった。MMPSC 法の適用により捕捉磁場は最大 4.16 T まで増大し、MMPSC 法の効果を確認することが出来たが、現在のところ 5 T を越える捕捉磁場は実現できていない。面内のピン止め力の不均一がパルス着磁にとっては大きな障害となっている。印加磁場 B_{ex} と温度 T_s の精密な最適化と

もに、このような不均一バルクの着磁に対して、新たなパルス着磁法の検討が必要であると考えている。

参考文献

[1] H. Fujishiro *et al.*, Physica C **445-448** (2006) 334.

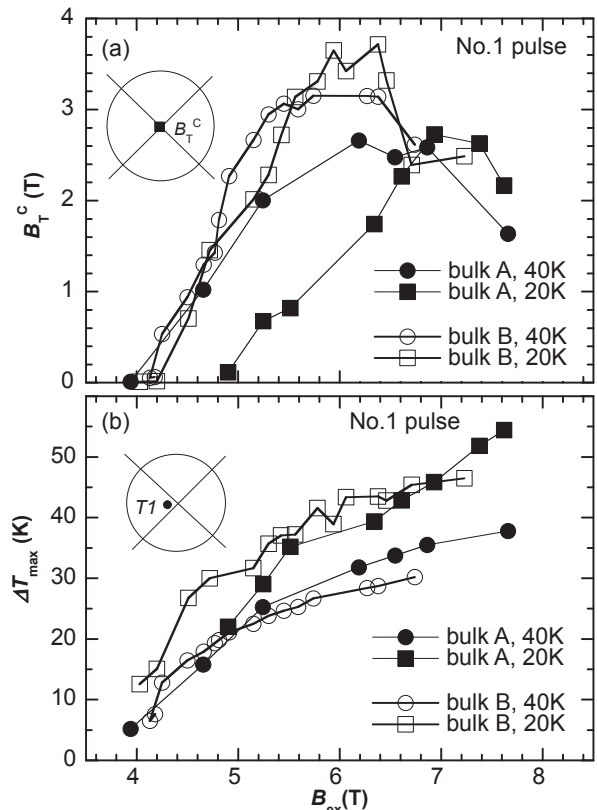


Fig. 1. (a) The trapped field B_T^c and (b) the maximum temperature rise ΔT_{max} at the bulk center as a function of the applied pulsed field B_{ex} for the bulk A and B at $T_s=20$ K and 40 K.

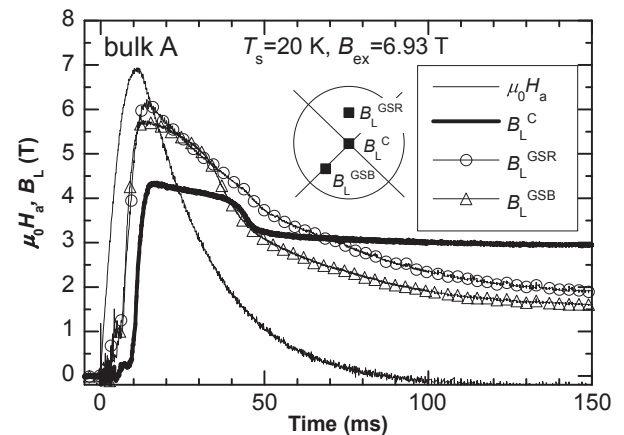


Fig. 2. The time dependence of the applied field $\mu_0 H_a(t)$ and the local fields (B_L^c , B_L^{GSR} , B_L^{GSB}) on the bulk surface for the bulk A after applying the pulse field of $B_{\text{ex}}=6.93$ T at $T_s=20$ K.

薄膜超電導線材の細線化開発

Development of slim type RE-Ba-Cu-O Coated Conductors

種子田 賢宏, 上山 宗譜, 新海 優樹, 太田 肇, 小西 昌也, 永石 竜起, 加藤 武志, 大屋 正義, 増田 孝人(住友電工)
 TANEDA Takahiro, UHEYAMA Munetsugu, SHINGAI Yuki, OTA Hajime, KONISHI Masaya, NAGAISHI Tatsuki,
 KATO Takeshi, OHYA Masayoshi, MASUDA Takato (SEI)
 E-mail: taneda-takahiro@sei.co.jp

1. はじめに

RE123 (RE : Y, 希土類元素) 系の薄膜超電導線材を超電導ケーブル等の電力機器用途への適用するための検討・開発が精力的に行われている。例えば、超電導ケーブルでは薄膜超電導線材がフォーマにスパイラル状に巻かれて集合されるが、通電により個々の薄膜超電導線材には主として円周方向の磁界が印加される。ケーブルの断面を考えたとき、フォーマに沿って幅の狭い線材が滑らかな円周を構成するように配置すれば、個々の薄膜超電導線材に印加される磁界はテープ面に平行方向な成分が支配的となるため、交流通電損失の低減に有効であると考えられる [1]。本研究では 10mm 幅の基材に成膜された薄膜超電導線材を 4mm 幅に細線化し、銅保護層まで形成した線材の特性および 2mm 幅細線化の試作結果について報告する。また、4mm 幅線材を用いた 10m 長ケーブルの試作結果、低磁性線材を用いた 1m 長ケーブルの試作結果についても紹介する予定である。

2. 実験方法

幅 10mm、面内配向性 $\Delta\phi$ が約 7° の Ni 系合金配向基板を用い、その上に $\text{CeO}_2 / \text{YSZ} / \text{CeO}_2$ 三層構造中間層を気相法により、エピタキシャル成長させた。中間層の各層はスパッタリング法等を用いて成膜した。さらに、得られた中間層の上に $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (RE = Ho, Gd) 膜をパルスレーザー蒸着法で、安定化層をスパッタリング法等で成膜し、線材を作製した。これを切断加工し、銅安定化層を形成した。

作製した線材は、四端子法により超電導特性を評価した。

3. 実験結果と考察

10mm 幅、長さ 10m 級、 $I_c=140\sim 160\text{A}$ 程度の線材を 4mm 幅に切断加工し、銅保護層を形成する試作を行った。図 1 に試作した 4mm 幅線材の長手方向の I_c 分布を示す。切断加工、銅保護層形成による J_c の維持率は約 8 割であった。

また、長手方向の局所的な I_c 低下はなかった。図 2 は $I_c=140\text{A}$ 程度の線材を 2mm 幅に切断加工し、全長 I_c を線材長についてプロットした結果である。線材長が 20m 程度に長くなっても短尺と同等の I_c を維持していることが分かった。

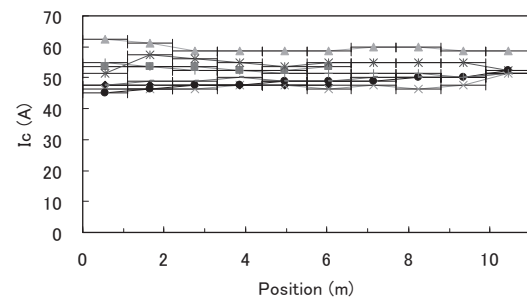


Fig. 1 I_c distributions of 4 mm wide coated conductors.

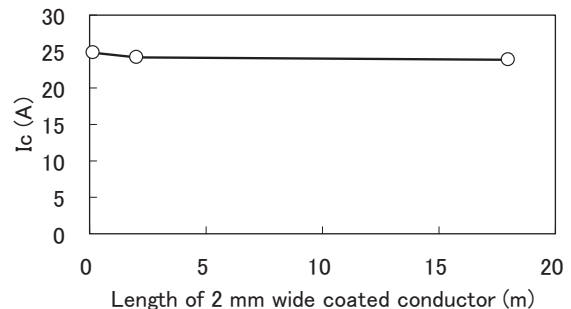


Fig. 2 I_c vs. length of 2 mm wide coated conductors.

謝辞

本研究の一部は超電導応用基盤技術研究体の研究として、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託を受けて実施したものである。

参考文献

[1] Naoyuki Amemiya, presentation at International Workshop on Coated Conductors for Applications 2007. (CCA 2007)

レーザースクライビングによる長尺Y系線材細線加工

Development of Laser Scribing Process for long YBCO Coated Conductors

須藤 泰範, 中西 達尚, 三浦 正志, 吉積 正晃, 和泉 輝郎, 山田 穰, 塩原 融(SRL), 飯島 康裕, 斉藤 隆(フジクラ)

SUTOH Yasunori, NAKANISHI Tatsunao, MIURA Masashi, YOSHIZUMI Masateru, IZUMI Teruo,

YAMADA Yutaka, SHIOHARA Yuh (SRL) ; IIJIMA Yasuhiro, SAITOH Takashi (Fujikura)

E-mail: ysutoh@istec.or.jp

1. はじめに

Y系線材はBi系線材に比べ、低コスト・高 J_c -B特性を有し、後加工(フィラメント化加工)により交流損失を低減することが可能なことから、電力機器応用に期待されている。我々は、交流応用を目指したスクライビング技術開発として、細線化による損失低減を実現してきた[1]。機器応用には、単長数10m~数100m長の線材が必要であり、長尺線材の安定加工技術や細線加工可能な線材であるかの事前評価方法の確立が求められている。今回、5mm幅の線材に関して、分割数を増やした場合における加工前後の特性評価および特性分布、5分割時の線材長さに対する加工後特性評価を行ったので報告する。

2. 実験方法

YAGレーザーを用い、IBAD-Gd₂Zr₂O₇中間層上に、PLD法によりCeO₂キャップ層、GdBCO超電導層を成膜後、保護層としてAgを約20 μ m形成した5mm幅 $I_c=60\sim 80$ A程度の試料を、溝幅約30 μ mで細線加工した。レーザー加工の影響による劣化を調べるために、5mm幅で0.5m長の線材の I_c を測定後、3分割、5分割、10分割し、加工後 I_c 及び各フィラメントの I_c を測定した。次に、長尺線材加工の安定性を確認するために、0.5~50m長の5mm幅線材を5分割加工し、加工前後での I_c 特性の比較を行った。 I_c 測定は、4端子法を用い、液体窒素温度(77K)にて1 μ V/cmの定義にて行った。各フィラメントの I_c 評価は、フィラメントを1本ずつ切断するスクラッチ法により行った。

3. 結果及び検討

0.5m長の線材を3本ずつ3分割、5分割、10分割加工した場合における、加工前 I_c を100%とした時の加工後の I_c 割合を図1に示す。分割数(レーザーによる加工回数)を増やし、フィラメント幅を狭くしても、加工後 I_c の割合にはほとんど変化がみられなかった。これらの3分割、5分割、10分割した線材について、各フィラメント I_c の分布を測定した結果の一例を図2に示す。各フィラメントの I_c 値にはばらつきが生じていることが分かる。上記結果から、特性低下の要因は、レーザー加工による熱的影響よりも、線材が持つ特性分布による影響が大きいと考えられる。

図3に、0.5~50m長線材を5分割加工した場合における加工前 I_c を100%とした場合の、加工後総 I_c の割合を示す。線材長が長くなっても加工後の総 I_c の割合は8割以上であることから、50m長の長尺線材においても細線加工が安定してできていると考えられる。

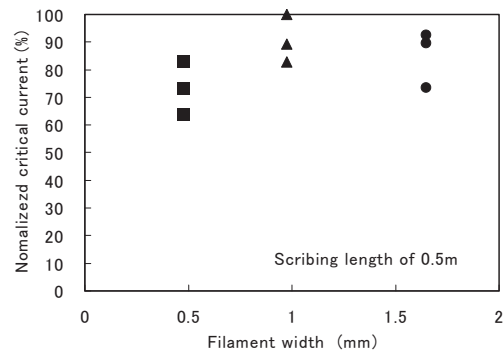


Fig.1 Normalized critical current ($I_{c_{after\ scribe}}/I_{c_{before\ scribe}}*100$) as a function of the filament width.

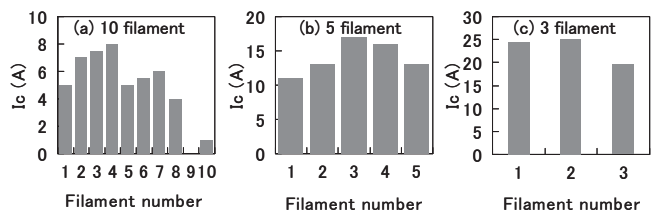


Fig.2 Distribution of filament I_c with (a)10 filament, (b)5 filament and (c)3 filament structure.

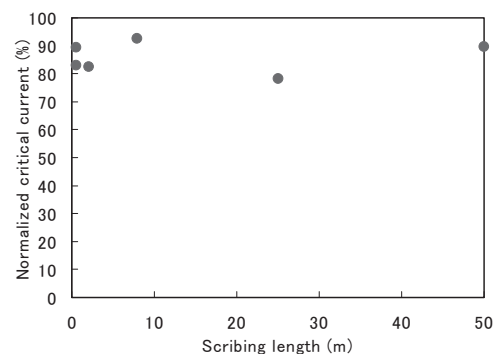


Fig.3 Normalized critical current ($(I_{c_{after\ scribe}}/I_{c_{before\ scribe}})*100$) as a function of the tape length scribed into 5 filament structure.

謝辞

本研究は、超電導応用基盤技術研究開発業務の一環として、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託により実施したものである。

参考文献

1. 須藤他 2007年秋季低温工学予稿集 P116

YBCO 超電導線材の過電流パルス通電による特性劣化と層間剥離

Degradation and Delamination of YBCO Tapes due to Over-current Pulse Drive

河野 秀太郎, 王 旭東, 西尾 幸恭, 植田 浩史, 石山 敦士 (早稲田大学); 鹿島 直二, 長屋 重夫 (中部電力); 八木 正史, 向山 晋一 (古河電工); 加藤 英幸 (産総研); 塩原 融 (ISTEC-SRL)

KONO Hidetaro, WANG Xudong, NISHIO Yukiyasu, UEDA Hiroshi, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University); KASHIMA Naoji, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power); YAGI Masashi, MUKOYAMA Shinichi (Furukawa Electric); KATO Hideyuki (AIST); SHIOHARA Yuh (ISTEC-SRL)

E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

我々はYBCO超電導線材の過電流パルス通電による特性劣化試験を行ってきた^[1]。過電流パルス通電に起因する電磁的、機械的、熱的応力が積層構造を有するYBCO線材の層間剥離を引き起こし、それが特性劣化の要因となっている可能性がある。そこで我々は線材の層間剥離に注目し、特性劣化との関係を調査することにした。今回は、細線化された線材を用いて過電流パルス通電による特性劣化試験を行い、試験前後の線材の層間の状態を層間接触状態観測・およびEPMA元素分析により調査したので報告する。

2. 実験方法

実験に用いた2本の線材(Sample 1, 2)はIBAD/MOCVD法で作製されたもので、安定化層として銀層(15 μm)の上に銅層(100 μm)がハンダ付けされている。これらの線材は、もともと幅1 cmだった線材をレーザーを用いて幅方向に5分割したうちの2本で、幅2 mmである。Sample 1は分割前の線材のエッジ部分、Sample 2はエッジでない部分である。

まず、過電流パルス通電による特性劣化試験の前に線材の I_c 測定を行い、さらに層間接触状態観測により、劣化前の線材の層間の状態を調べた。層間接触状態観測の手順を以下に示す。

- (i) 線材のハステロイ側に交流のレーザー光を照射する
- (ii) 線材内部を熱が伝わっていき、やがて安定化層面から赤外線が放射される
- (iii) その赤外線の振幅と位相差を測定する

この測定を、レーザー光を照射する点を線材長手方向に1 mmピッチでずらしながら行った。線材上に層間剥離している箇所があれば、その箇所では熱伝導が悪くなるので、線材から放射される赤外線の振幅が小さくなり、位相が遅れる。これにより層間剥離が見つけられるという原理である。層間接触状態観測を行った後、続いて過電流パルス通電による特性劣化試験を行った。本実験では、2 A以上の I_c の低下を劣化と定義し、劣化開始時の最高到達温度を測定した。なお、運転温度は77 Kとした。劣化試験を行った後、再び層間接触状態観測を行った。その結果を、劣化試験前の層間接触状態観測の結果と比較し、層間接触の変化を調べた。線材上に層間剥離している箇所があれば、その部分に関してEPMA元素分析を行い、どの層間で剥離しているのかを調査した。

3. 実験結果

Sample 1, Sample 2の劣化試験前後の層間接触状態観測の結果(位相差)をそれぞれFig. 1, Fig. 2に示す。各図中には、層間接触状態観測の結果と併せて、劣化試験前後の各箇所の I_c を示してある。また、各図中の横軸は測定区間の左端からの距離である。なお、Sample 1, Sample 2の劣化開始温度はそれぞれ711-956 K, 342-398 Kであった。

Fig. 1を見ると、Sample 1に関しては劣化試験前に左端から約0.5 cmの箇所ですでに剥離が確認されているが、その箇所は劣化していない。しかし、過電流パルス通電後、 I_c の劣化が確認された約2~5 cmの箇所では、劣化試験後の層間接

触状態観測で新たな剥離が確認された。EPMA元素分析によると、これらの剥離はどちらも、安定化層である銅と銀の界面のハンダ部分での剥離であると確認された。一方、Fig. 2を見ると、Sample 2に関しては劣化試験後、約0.5~1 cmの箇所劣化が確認されたが、今回の層間接触状態観測では剥離は確認されなかった。

4. まとめ

Sample 1の劣化試験後に見つかった剥離に関しては、安定化層のハンダ部分の剥離ということから、過電流パルス通電時の温度上昇によりハンダが溶けたことによる可能性が考えられる。また、Sample 2に関しては剥離と思われる箇所は確認されなかった。今回の実験では、線材の特性劣化に影響を与えたと断定できるような剥離は確認されなかった。今後は銅無し線材で同じ実験を行うこと、および剥離箇所の様子をSEM・TEMにより観察することにより、線材の特性劣化と層間剥離の関係を調査していく予定である。

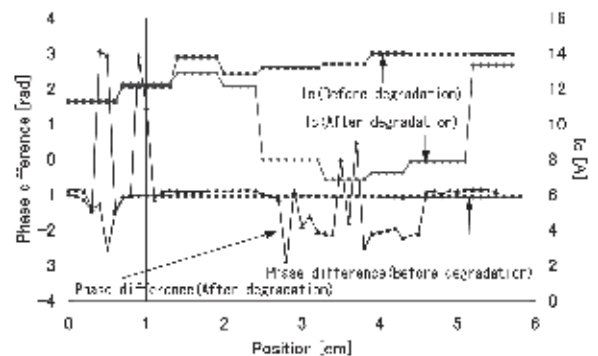


Fig.1 Results of degradation and delamination tests (Sample1)

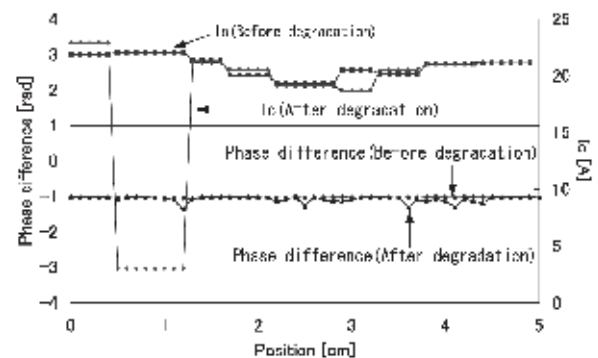


Fig.2 Results of degradation and delamination tests (Sample2)

なお本研究は、超電導応用基盤技術研究体の一部として新エネルギー産業技術総合開発機構の委託により実施したものである。

文献

- [1]佐藤俊祐他:2008年度春季低温工学・超電導学会講演概要集(講演番号 2P-p13)

Ni-W 基板を用いた TFA-YBCO 高 I_c 線材の検討Preparation of high I_c YBCO coated conductor on the Ni-W substrate by the TFA-MOD process高橋保夫、小泉勉、兼子敦、青木裕治、長谷川隆代（昭和電線ケーブルシステム(株)）、
塩原融（超電導工学研究所）

Y.Takahashi, T.Koizumi, T.Nakanishi, T.Hasegawa (SWCC Showa Cable System Co. Ltd).

Y.Shiohara (ISTEC-SRL)

e-mail: k920112@snt1.swcc.co.jp.

はじめに： 極低次世代線材の検討として CeO_2 (RF-スパッタ)/ $Ce-Zr-O$ (MOD)/ CeO_2 /Ni-W 構造の中間層の検討を行ってきた。YBCO については超電導工学研究所 (SRL) で開発された Ba-Poor 溶液を使用した TFA-MOD 法を用い、NEDO 応用基盤プロジェクトの極低コスト線材における目標値である 50m 線材に向け、作製条件の検討を進めてきた。以前の報告において、 CeO_2 /CZO/Ni-W 上に成膜した YBCO 膜 (TFA-MOD) で $201A/cm-w$ の I_c が得られたことを報告した。また CeO_2 膜の薄膜化の検討を行い、TFA-MOD プロセスにおける限界膜厚の報告をしてきた。本報告では Ni-W 上に成膜した中間層の開発状況と YBCO の高特化性検討結果について報告する。

実験方法： 配向熱処理を施した Ni-3at%W テープ上の中間層として MOD 法で成膜した $Ce-Zr-O$ (CZO)バリア層と RF スパッタ法で作製した CeO_2 キャップ層の 2 層構造 (CeO_2 /CZO/NiW) を採用した。CZO 膜の焼成及び CeO_2 膜の成膜は Reel-to-reel(RTR) 式の連続熱処理法により行った。YBCO 膜の作製は TFA-MOD 法で行った。TFA 溶液の組成は Y:Ba:Cu=1:1.5:3 とした。YBCO 膜を焼成は結晶化させる本焼プロセスは、50-150 Torr の減圧雰囲気で行い、焼成温度は $710-740^\circ C$ とし、 $Ar-O_2$ に H_2O 加湿した雰囲気中で行った。中間層および YBCO 膜のは表面観察は SEM 及び AFM で行い、結晶構造は XRD ($\theta/2\theta$, 極点図) で評価した。輸送電流特性 (J_c) の測定は 77K、自己磁界中で直流四端子法を用いて行い、 $1\mu V/cm$ の電圧基準で定義した。

結果： 前回、短尺焼成試験において面内配向度 $8.3deg.$ の CeO_2 中間層上(▲)で $201A/cm-w$ ($J_c=1.2MA/cm^2$) の I_c が得られたことを報告した。今回、圧延工程の改良による Ni-W 基板の平坦性を向上させた Ni-W 基板を用いて検討した。従来法で作製した基板上に作製した面内配向度 $8.2deg.$ (CeO_2) の中間層上で $245A/cm-w$ の I_c ($J_c=1.5MA/cm^2$) を得た。また、 CeO_2 の配向性を向上させることにより更に高 I_c 化が可能となり、 $7.6deg.$ の CeO_2 中間層上の YBCO 膜においては、 $297A/cm-w$ ($J_c=2.1MA/cm^2$) を得た。それに対して、Ni-W 基板の圧延工程の改良による平坦性の向上及び中間層成膜の最適化により CeO_2 -cap 層の配向性を $7.6deg.$ に向上させることによって、 $297A/cm-w$ という非常に高い I_c を得た。 J_c は約 $2.1MA/cm^2$ となっている。長尺線材の焼成に使用するバッチ式本焼プロセスにおいては、長手方向の均一性を増すために T_{max} での保持時間を長くする傾向がある。長尺線材の焼成条件の指針を得る事を目的として、 T_{max} の保持時間が I_c に対して及ぼす影響を

調査した。その結果、10 時間程度の焼成では I_c の劣化は認められなかった。また中間層の長尺化については、約 500m 長の CeO_2 層、CZO 層、それぞれを RTR 式プロセスで成膜し、均一な配向性を得ることが可能であることがわかった。

謝辞： 本研究は、超電導応用基盤技術研究体の研究として、ISTEC を通じて新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託により実施したものである。

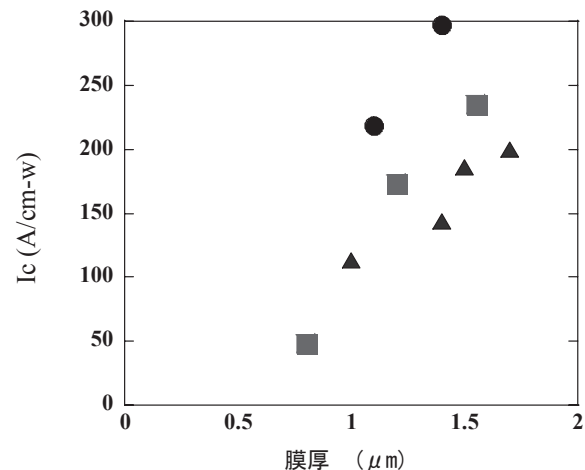


Fig1. I_c mesurment results of YBCO/ CeO_2 /CZO/NiW tapes on various CeO_2 -cap layer.

- : FWHM of CeO_2 : $7.6deg.$ (improved Ni-W tapes)
- : FWHM of CeO_2 : $8.2deg.$ (improved Ni-W tapes)
- ▲ : FWHM of CeO_2 : $8.3deg.$ (Standard Ni-W tapes)

MOCVD-YBCO 線材における臨界電流の可逆ひずみ特性におよぼす 温度および磁場の影響

Effects of temperature and magnetic field on reversible I_c -strain characteristics for MOCVD-YBCO coated conductor

菅野未知央, 中村武恒, 真鍋智之 (京大), 式町浩二, 平野直樹, 長屋重夫 (中部電力)

SUGANO Michinaka, NAKAMURA Taketune, MANABE Tomoyuki (Kyoto Univ.);

SHIKIMACHI Koji, HIRANO Naoki, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co.)

E-mail : sugano@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、NEDO の委託事業「超電導電力ネットワーク制御技術開発」の一環として、YBCO coated conductor を超電導磁気エネルギー貯蔵 (SMES) 用コイルに応用するための基礎特性評価を実施している。Y 系線材を用いた SMES コイルの特徴は、Hastelloy 基板の高い機械的強度を活かして高応力設計が可能となることである。これにより、コイルサイズの小型化が実現されるという利点がある。一方、応力を設計段階で制約条件に加えるためには、Y 系線材の磁場印加状態での I_c -ひずみ特性を正確に把握しておく必要がある。特に、Y 系線材ではひずみの負荷/除荷に伴って、超伝導体の破壊開始以前の可逆ひずみ領域においても I_c が変化することが知られており、臨界電流が最大となるひずみ条件を様々な温度、磁場条件で実測することは、真の最適設計のためには不可欠である。

本発表では、前回報告した 77 K での磁場中 I_c -ひずみ測定 [1] を様々な温度領域に拡張した結果について報告する。

2. 実験方法

クライオスタット中で Y 系線材の長さ方向に引張りひずみを負荷するため、自作のひずみ負荷プローブを使用した [1]。本装置は、線材の両端を電極を兼ねた銅ブロックにハンダ付けた状態で冷却し、その一端を水平移動させることによりひずみを負荷する仕組みになっている。この負荷方式の利点は、冷却時に治具の熱収縮の影響を受けないという点である。10 T の伝導冷却マグネットの室温ポアに、温度可変クライオスタットを挿入し、さらにひずみ負荷プローブをクライオスタットに挿入して試験を行った。温度コントロールは、77 K では大気圧液体窒素、70 K では減圧液体窒素、それ以外の温度ではヘリウムガスフローという 3 種類の冷却方法を採用した。 I_c -ひずみ測定は、最大 10 T まで磁場を印加した状態で実施した。磁場の印加方向は全て線材テープ面に垂直 ($B//c$) とした。

測定に用いたサンプルの構造は、Ag(10 μm)/YBCO(1 μm)/CeO₂(0.4 μm)/GZO(1 μm)/Hastelloy C-276(100 μm) である。ここで、YBCO 層は MOCVD 法により成膜されている。

3. 実験結果

Fig. 1 に 70 K で測定した Y 系線材のゼロひずみで規格化した I_c -ひずみ特性を示す。ここで、負荷ひずみ $\varepsilon_a=0.8\%$ 以下では、除荷により I_c が初期曲線の値まで回復することから、可逆ひずみ領域における変化であることが確認されている。自己磁場でのデータと比較すると、 $B=0.4$ T までは、磁場の増加とともに I_c の負荷ひずみによる変化が小さくなる傾向が観察された。一方、それ以上の磁場ではこの傾向が逆転し、 $B=10$ T まで系統的に磁場の増加とともに負荷ひずみによる I_c の変化が大きくなることが確認された。

I_c -ひずみ特性の温度、磁場による変化を定量的に評価する

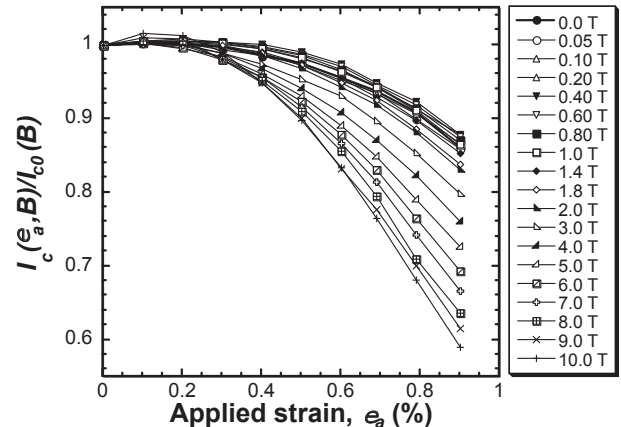


Fig. 1 I_c -strain characteristics measured at 70 K under magnetic fields up to 10 T.

ため、測定したデータを式(1)に示す関数により近似し、曲線の形状を特徴づけるパラメータを抽出した。

$$\frac{I_c(B, T, \varepsilon_a)}{I_c(B, T, \varepsilon_a = 0)} = \frac{1 - a(\varepsilon_a - \varepsilon_p)^2}{1 - a(-\varepsilon_p)^2} \quad (1)$$

ここで、 a 、 ε_p はフィッティングパラメータであり、それぞれ曲線の曲率およびピーク位置でのひずみ値に相当する。

77 K、70 K、60 K での測定データについて温度、磁場による、 a 、 ε_p の変化を観察した。その結果、 ε_p は、低磁場で極大値を取ることが確認された。一方、 a 値は高温、高磁場ほど大きくなる傾向が観察された。このことから、低磁場でピークひずみが高ひずみ側にシフトすることにより I_c の負荷ひずみによる変化が小さくなるという、Y 系線材独特の振る舞い示すことが明らかになった。一方、高磁場では I_c がより強くひずみに依存するため、負荷ひずみによる I_c の変化が大きくなることが確認された。また、この曲率の変化の傾向は高温ほど顕著になることが確認された。

謝辞

本研究は、NEDO の委託事業「超電導電力ネットワーク制御技術開発」の一環で実施したものである。なお、本研究に用いた YBCO 線材は、超電導応用基盤技術研究開発業務の一環として、ISTEC を通じて NEDO の委託により中部電力が製作したものである。

参考文献

[1] M. Sugano et al, Abstract of CSJ Conference 77 (2007) 3A-p09.

ナノロッドを含む REBCO 薄膜の磁束ピンニング特性

Flux pinning properties in REBCO thin films with nano-rods

末吉 哲郎, 米倉健志, 梶田龍, 藤吉 孝則(熊本大); 向田昌志, 寺西亮(九州大);
 松本要(九工大); 吉田隆(名古屋大); 一瀬中(電中研); 堀井滋(東大); 淡路智, 渡辺和雄(東北大)
 SUEYOSHI Tetsuro, YONEKURA Kenji, KAJITA Ryu, FUJIYOSHI Takanori (Kumamoto Univ.); MUKAIDA Masashi,
 TERANISHI Ryo (Kyushu Univ.); MATSUMOTO Kaname (Kyushu Inst. of Tech.); YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.);
 ICHINOSE Ataru (CRIEPI); HORII Shigeru (Univ. of Tokyo); AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.)
 E-mail: tetsu@cs.kumamoto-u.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導体において, 高磁場中での臨界電流密度 J_c を向上させるために, 有効に作用するピンニングセンターを人工的に導入する様々な方法が盛んに試みられている. 特に, Ba を含むペロブスカイト構造をもつ BaZrO₃ や BaSnO₃ を REBCO 薄膜中に導入すると, c 軸相関ピンとして作用するナノロッドを形成し, 有効なピンニングセンターとして作用することで注目を集めている[1]. 本研究では, BaZrO₃ や BaSnO₃ について様々な添加量に対する REBCO 薄膜の磁束ピンニング特性を調べた. 磁束グラス液体転移温度 T_g の電流-電圧特性の傾きを示すパラメータである m 値の磁場依存性において, c 軸相関ピンの特徴が顕著に現れることを以前報告している[2]. 今回, ナノロッドを形成する物質や添加量を変化させることで, c 軸相関ピンの種類や密度が m 値の磁場依存性に与える影響について考察を行った.

2. 実験方法

ArF エキシマレーザ蒸着法で, YBCO 薄膜を SrTiO₃ 基板上に作製した. ターゲットには, BaZrO₃ を 1.5wt%, 3.5wt% 添加, および無添加の YBCO ターゲットを用いた. また, BaSnO₃ を 2wt% 含んだ ErBCO ターゲットを用いて, 同様に SrTiO₃ 基板上に ErBCO 薄膜を作製した.

作製した薄膜は, 長さ 1mm, 幅 50 μ m のブリッジ状に加工して評価を行った. 四端子法を用いた通電特性から電界基準を $E=1.0 \times 10^{-3}$ V/m として J_c を定義した. J_c の磁場依存性, 磁束グラス液体転移温度 T_g での電流-電圧特性の傾き m 値を求める測定においては, 磁場は常に試料の c 軸に平行に印加した. また, J_c の磁場角度依存性では, 電流と常に直交するように磁場を印加し, 磁場と c 軸のなす角度 θ とした.

3. 結果および検討

Fig.1 に, $T=77.3$ K における J_c の磁場依存性を示す. BaZrO₃ を含む YBCO 薄膜, BaSnO₃ を含む ErBCO 薄膜とともに, as-grown YBCO 薄膜の J_c より高い値を示している. BaZrO₃ を 1.5wt% 添加した YBCO 薄膜は, 今回測定磁場の範囲内において最も高い J_c を示した. この試料は, $B=5$ T においても 10^5 A/cm² 以上の J_c を有している. 一方, 高磁場での高 J_c 特性が期待された BaSnO₃ を含む ErBCO 薄膜においては, 3.5wt% の BaZrO₃ を含む YBCO 薄膜より磁場に対する J_c の減少が, 顕著であり, $B=5$ T において両試料の J_c はほぼ同じ値を示している.

Fig.2 に, 磁束グラス液体総転移温度 T_g での電流-電圧特性の傾きを示すパラメータ m 値についての磁場依存性を示す. BaSnO₃ を含む ErBCO 薄膜においては, 磁場に対して m 値はフラットな振る舞いを示している. 一方, 1.5wt%, 3.5wt% の BaZrO₃ を含む YBCO 薄膜では, 磁場に対して単調減少するが, それに加えそれぞれ 0.8T, 1.5T 付近で kink, もしくはブロードなピークを示している. m 値は局所的な J_c の分布を特徴付けるパラメータであり, m

値の値が大きくなると局所的な J_c の値が揃うことを表している. さらに, 重イオン照射した YBCO 薄膜において, 照射量に対応した磁場で m 値の磁場依存性にピークが現れることが分かっている[3]. これらのことから, Fig.2 に見られる kink やピークは, 1 次元ピンに特徴的なマッチング現象であると考えられる.

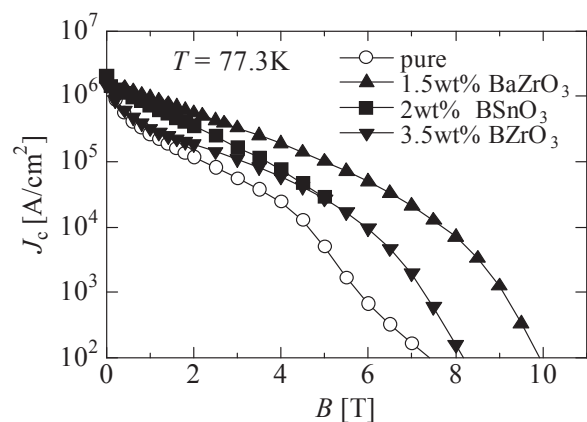


Fig.1 Magnetic field dependences of J_c for YBCO films with BaZrO₃ and ErBCO with BaSnO₃.

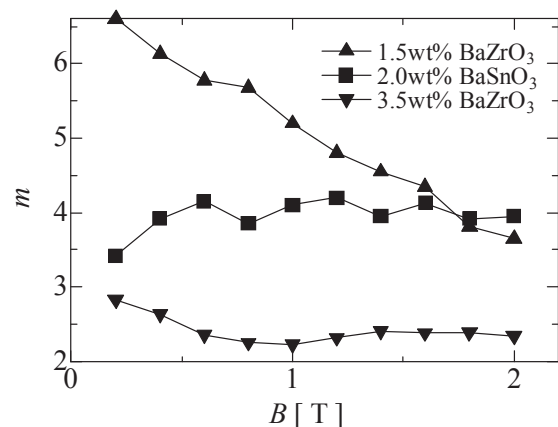


Fig.2 Magnetic field dependences of m for YBCO films with BaZrO₃ and ErBCO with BaSnO₃.

参考文献

1. A. Goyal, *et al.*: Supercond, Sci, Technol. 18 (2005) 1533.
2. M. Haruta *et al.*: Supercond, Sci, Technol. 19 (2006) 803.
3. T. Sueyoshi *et al.* Physica C 424 (2005) 123.

第3高調波誘導電圧を用いる超電導薄膜 J_c 測定法の標準化活動

Activities for the standardization of an ac inductive method to measure J_c of superconducting thin films using third-harmonic voltages

山崎 裕文, 馬渡 康徳 (産総研); 山田 博 (大島商船高専); 小田部 莊司 (九州工大); 金 錫範 (岡山大学); 大嶋 重利 (山形大学)

YAMASAKI Hirofumi, MAWATARI Yasunori (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, AIST); YAMADA Hiroshi, OTABE Edmund Soji, KIM Seokbeom, OHSHIMA Shigetoshi E-mail: h.yamasaki@aist.go.jp

I. はじめに

大面積超電導膜における臨界電流密度 J_c の分布を非破壊的に測定する方法として、第3高調波誘導電圧 V_3 を用いる方法がある。我々は、正確に J_c を測定する標準的な方法の提案のために、複数機関における測定などの活動を行っている。本発表では、我々がこれまで行ってきた標準化活動の概要について紹介する。

II. 第3高調波誘導電圧測定におけるノイズ低減方法

この方法では、膜の直上に設置した扁平な小コイルに通電して交流磁界を印加し、同じコイルの両端の電圧を計測して、第3高調波成分 V_3 が生じ始める時のコイル交流電流の閾値 I_{th} ($\propto J_c$) から J_c を計算する。超電導薄膜に流れるシールド電流が臨界電流に達するまでは薄膜付近の交流磁界は膜面にほぼ平行であるため、薄膜に誘起される電界の平均値は、 $I_0 = I_{th}$ の時 $E_{avg} = (3\sqrt{3}\pi/8) \mu_0 f d J_c$ (1) と概算され、周波数 f に比例する [1]。 I_{th} が周波数によって変化し、 J_c と (1) で計算した E の関係から電流電圧特性を測定できる [1]。2~3周波数における I_{th} の測定から、 J_c を電界基準で決定し、 n 値も得ることが我々の提案の主眼であり、ノイズを低減して V_3 を正確に測定する必要がある。

コイル通電のために発振器と電力増幅器を用いるが、高精度なものでも 0.01% 以上の高周波歪みがある。このノイズ V_{3N} を除去するために、測定コイルと同一仕様のキャンセルコイルを臨界電流の大きな超電導薄膜の上において R と L を測定コイルと同じにし、その両端の電圧を差し引けば良い [1]。ただ、試料とは別の超電導薄膜が必要となるため、薄膜無しのキャンセルコイルを用いる簡便法 [2]、空心のコイル2つを対向させて L を調整する方法 [3] も用いられている。また、大小2つのコイルを用いることでキャンセル回路を必要としない、2コイル法も提案されている (図1左)。外径 3 mm 程度の駆動コイルに通電して交流磁界を印加し、その外側に配置した検出コイルの両端の第3高調波誘導電圧を計測する。駆動コイルと検出コイルが同一の通常法に比べて、 V_{3N} の抵抗成分が無い分だけノイズが低減される。図1右の周波数依存性から、電流電圧特性を得ることができる。

III. 電界の計算値の過小評価の問題

(1) 式の電界の計算は、交流磁界がまさに薄膜の裏面に到達する時の平均値として計算しているが、実際の測定では、かなり磁束が裏面に突き抜けていて磁束の出入りが大きい時に閾値 I_{th} を決めるので、電界を

相当程度過小評価している可能性がある。直線電流による磁界が超電導薄膜の裏面に突き抜けたとき、薄膜に誘起される電界は (1) 式の計算値よりも2桁程度大きい、と言う理論計算の結果も有る [4]。しかし、 V_3 法で (1) 式によって得られた電流電圧特性を輸送法、及び、磁化法 (磁界掃引速度依存性) の結果と比較すると、 n 値が両者の中間の値をとり、全体として緩やかに上に凸の曲線を成して、磁束ガラス状態に特有の電流電圧特性を示している (図2)。この合理的な結果から、前述の電界の過小評価は大きな問題ではないことが示された。実際のコイル形状では、直線電流よりも磁界がより膜面に平行になっていて、電界がそれほど大きくならない、と推測される。

[参考文献] (1) H. Yamasaki, Y. Mawatari and Y. Nakagawa, Appl. Phys. Lett. **82**, 3275 (2003). (2) S. B. Kim, Physica C **463-465**, 702 (2007). (3) H. Yamada et al., J. Phys: Conf. Ser. **97**, 012005 (2008). (4) Y. Mawatari and J. R. Clem, Phys. Rev. B **74**, 144523 (2006).

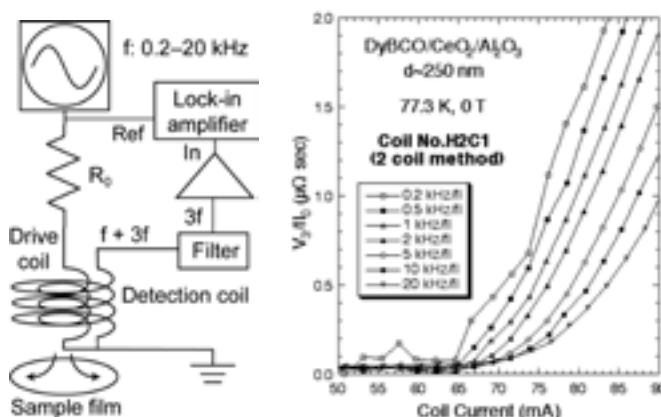


Fig. 1(left) Diagram for an electrical circuit used for the 2-coil method, and (right) the normalized V_3 vs coil current data.

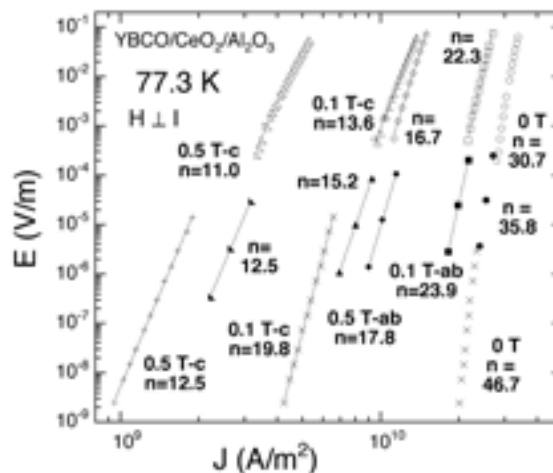


Fig. 2 E - J characteristics in a YBCO film measured by a transport method (open symbols), by the V_3 inductive method (closed symbols), and from dc magnetization (\times and $+$).

無限に積層した超伝導／強磁性テープ線材の電磁特性

Electromagnetic phenomena of an infinite stack of superconductor/ferromagnet tapes

馬渡 康德(産総研)

MAWATARI Yasunori (AIST)

E-mail: y.mawatari@aist.go.jp

1. はじめに

RE-123 系超伝導テープ線材における金属基板として、Ni-W 合金のような強磁性体が用いられることがある。このような超伝導／強磁性テープ線材 (SC/FM tape) において、超伝導体と強磁性体との磁氣的相互作用が線材の電磁特性に及ぼす影響を明らかにする必要がある。

我々は、強磁性体基板を ideal soft magnet としてモデル化し、SC/FM tape における電流・磁場分布を等角写像により解析的に求める理論解析手法を考案した[1]。昨年は、孤立した一枚のテープ線材の電磁特性について報告したが、今回は、無限に積層した SC/FM tape に輸送電流を流す場合の電流・磁場分布、磁束侵入、および交流損失について、無限に積層した非磁性基板上的超伝導テープ線材 (SC tape) の電磁特性[2,3]と比較した結果について報告する。

2. 超伝導／強磁性テープ線材とその積層導体

幅が $2a$ で z 方向に無限に長く、超伝導層膜の厚さが d_s 、強磁性基板の厚さが d_m の SC/FM tape を考える。簡単のため、バッファ層や保護層は無視し、線材の厚さ d_s+d_m が幅 $2a$ や積層間隔 D_s に比べて十分薄い極限を考察する。超伝導層の臨界電流密度 j_c は一定とする臨界状態モデルに基づいて解析を行い、線材一枚の臨界電流は $I_c = 2j_c a d_s$ である。Ni-W 合金は soft magnet としての性質を持つことから、強磁性体基板を ideal soft magnet (透磁率は線形で無限大とし、磁化の飽和や履歴を無視した磁性体) として取り扱う[1]。

このような SC/FM tape を、Fig. 1 のように y 方向に D_s の周期で無限に積層し、そのような積層導体に輸送電流を流す場合を考える。

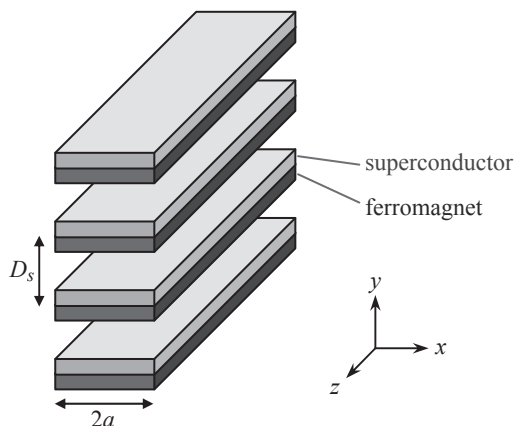


Fig. 1: Configuration of an infinite stack of superconductor/ferromagnet (SC/FM) tapes. Each tape has the width $2a$ and carries an ac transport current of the amplitude I_0 . The SC/FM tapes are stacked with the periodicity D_s .

2. 積層した超伝導／非磁性テープ線材の交流損失

非磁性基板をもつ超伝導テープ線材 (SC tape) を無限に積層した導体に交流電流を流したときの線材一枚あたりの損失 Q_{SC} は、文献[2,3]に与えられている。テープ線材を積層すると輸送電流による磁場が強め合うため、Fig. 2 に破線で示したとおり、 Q_{SC} は積層間隔 D_s が小さくなるとともに増大する。積層した SC tape ($D_s/a = 0.5$) の損失は、孤立した一枚の SC tape ($D_s/a \rightarrow \infty$) の損失の 6 倍～数十倍である。

3. 積層した超伝導／強磁性テープ線材の交流損失

SC/FM tape を無限に積層した集合導体に、振幅 I_0 の交流電流を流したときの線材一枚あたりの損失 $Q_{SC/FM}$ を、Fig. 2 に実線で示した。積層した SC/FM tape ($D_s/a = 0.5$) の損失は、孤立した一枚の SC/FM tape ($D_s/a \rightarrow \infty$) の損失の 2 倍程度である。

孤立した一枚の線材 ($D_s/a \rightarrow \infty$) について、 $Q_{SC/FM}$ は Q_{SC} より大きく、3 倍～10 倍以上であることが知られている[4-7]。一方、積層間隔が小さい ($D_s/a = 0.5$) 積層導体では、 $Q_{SC/FM}$ は Q_{SC} と同程度であり、場合によっては SC/FM tape の損失の方が SC tape の損失より小さいことがある。

参考文献

- [1] Y. Mawatari, Phys. Rev. B, **77**, 104505 (2008).
- [2] Y. Mawatari, in *Advances in Superconductivity IX*, (Proc. ISS-1996, Springer, Tokyo, 1997), p. 575.
- [3] K.-H. Muller, Physica C **289**, 123 (1997).
- [4] O. Tsukamoto et al., Physica C **463-465**, 770 (2007).
- [5] N. Amemiya et al., Physica C **463-465**, 775 (2007).
- [6] D. Miyagi et al., Physica C **463-465**, 781 (2007).
- [7] Y. Mawatari, Abstracts of CSJ Conference, vol. 77, p. 6 (2007).

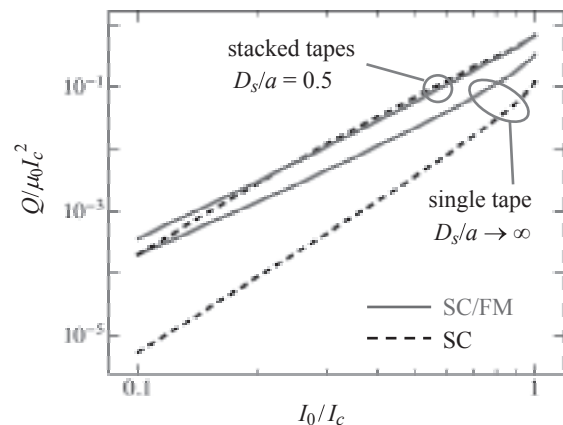


Fig. 2: Alternating current loss Q of each tape per unit length in the infinite stacks as the function of the current amplitude I_0 : $Q = Q_{SC/FM}$ of stacked SC/FM tapes (solid) and $Q = Q_{SC}$ of stacked SC tapes (dashed).

高温超伝導電流トランスを利用した大容量超伝導導体の通電損失測定

Measurement of transport current losses in HTS conductors with large current capacity by using HTS current transformer

加藤 和洋, 川畑 秋馬, 川越 明史, 住吉 文夫 (鹿児島大)
 KATOHI Kazuhiro, KAWABATA Shuma, KAWAGOE Akifumi, SUMIYOSHI Fumio
 E-mail: k2265298@kadai.jp

1. はじめに

超伝導機器や電力ケーブルに用いられる大容量超伝導導体の交流損失特性や通電特性などの基礎特性を定量的に評価することは、それらの機器やケーブルを設計する上で重要である。しかし、導体レベルの特性の理論的な評価は困難であり、測定可能な装置も存在しない。そこで我々は、種々の電磁環境下や幅広い温度領域で高温超伝導大型導体の基礎電磁特性を測定できるコンパクトな装置の開発を進めてきた[1]。今回は、この特性評価装置の構成要素である高温超伝導電流トランスを利用して通電損失測定を行ったので、測定結果について報告する。

2. 測定方法

サンプルへの通電に用いる電流トランスは、1次側、2次側ともに Bi-2223 線材を巻線に用いており、50A 程度の小容量電源で 1kA 級の大電流を通電することができる。巻線に使用した線材と電流トランスのパラメータを Table 1 に示す。電流トランスの概観写真を Fig.1 に示す。この電流トランスは、内径 72 mm の FRP デュウ内に挿入して使用できる小型でありながら大電流容量とするために楕円形状巻線を採用している。1次側巻線は、線材 1 本を用いて 133 ターン巻線しており、2次側巻線は、16 本の線材から成る並列導体を用いて、2 ターン巻線したものである。今回のサンプルには、Fig.1 に示すように、電流トランスの 2 次側巻線を引き伸ばして使用した。サンプルはハンダ接続された往復導体となっている。

損失測定は、測定条件や試料条件の制約が少ないポインティングベクトル法を用いて行った。ポインティングベクトル法では、サンプル周りのポインティングベクトル分布を求め、それらを面積積分することで損失値が得られる。局所電界測定用ポテンシャルリードと局所磁界測定用ピックアップコイルのセット 14 組をサンプル周りに Fig.2 のように配置し、サンプル周りのポインティングベクトル分布を測定した。なお、本測定法の妥当性は、1 本の Bi-2223 短尺線材の通電損失測定により確かめた。

3. 結果及び検討

16 本の Bi-2223 テープ線材から成る並列導体の通電損失の測定結果を Fig.3 に示す。横軸は通電電流のピーク値を、縦軸は測定した通電損失を表している。白抜きプロットは、サンプル周囲の四つ角に斜めに設置した 4 組のポテンシャルリードとピックアップコイルを測定から省いた 10 組の測定素子群による測定データである。黒塗りプロットは、14 組の測定素子群による測定データである。通電電流の周波数が 40Hz の

データを丸印で、100Hz のデータを三角印で示している。10 組と 14 組の測定結果は良く一致しており、測定箇所は十分であったと考えられる。また測定データは周波数に依存せず、通電電流の 3 乗に比例していることから、ヒステリシス損失が測定されていると考えられる。

実線と破線は、サンプルを 1 本の導体として Norris の理論式を使って求めた理論値である。実線は、往復導体の磁界による臨界電流値の低下を考慮して計算した結果であり、破線は、線材 1 本の自己磁界中の臨界電流を 16 倍したものを導体の臨界電流として計算した結果である。2 つの計算値の間に測定結果があることがわかる。

以上のことから、電流トランスを用いて通電されたサンプルの通電損失が、ポインティングベクトル法によって 2~3 割の精度で測定出来ていることがわかった。今後は、測定温度を 66K とした場合の測定や外部磁界印加マグネットを使った同時掃引時の測定を行い、本測定装置の有効性を確かめる。

参考文献

1. 中濱 佑充 他, 2007 年度春季低温工学・超伝導学会講演概要集, p.102

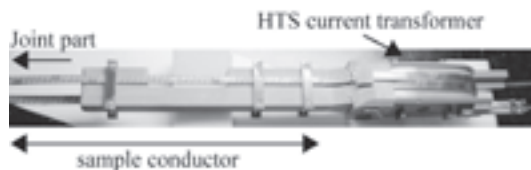


Fig.1 HTS current transformer

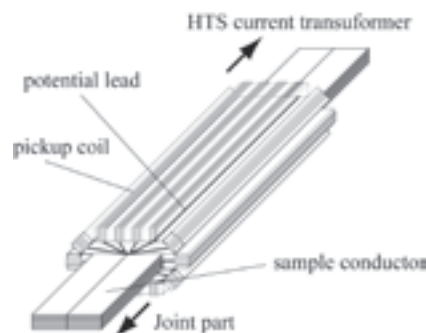


Fig.2 Set up of potential leads and pick up coils

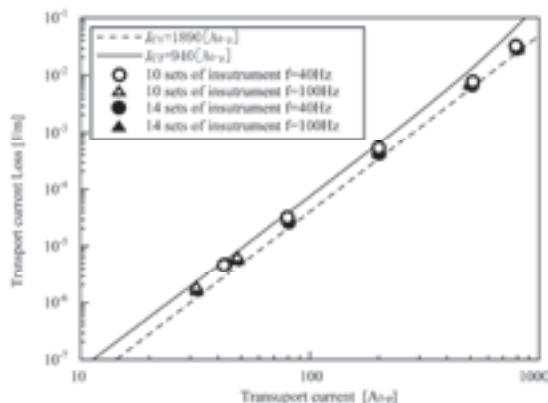


Fig.3 Measured ac losses

Table 1 Specification of Bi-2223 tape and HTS current transformer

HTS tape	Ag/ Bi-2223
critical current I_c	118A@77K
tape number of primary winding	1
tape number of secondary winding	16
turn number of primary winding	133
turn number of secondary winding	2
current ratio I_2/I_1	880A/40A

Flux pinning properties of BaMO₃-doped YBa₂Cu₃O_{7-x} thin films (M= Zr, Sn)

メレ パオロ (九工大), 松本 要 (九工大), 堀出 朋哉 (京大), 一瀬 中 (電中研), 向田 昌志 (九大), 吉田 隆 (名大), 堀井 滋 (東大), 喜多 隆介 (静岡大)

MELE Paolo (Kyushu Institute of Technology), MATSUMOTO Kaname (Kyushu Institute of Technology), HORIDE Tomoya (Kyoto University); ICHINOSE Ataru (CRIEPI); MUKAIDA Masashi (Kyushu University); YOSHIDA Yutaka (Nagoya University); HORII Shigeru (Tokyo University), KITA Ryusuke (Shizuoka University)

E-mail: pmele@post.matsc.kyutech.ac.jp

1. Introduction

One of the most fascinating challenges of the materials science is to disclose the YBa₂Cu₃O_{7-x} (YBCO) superconducting coated conductors to the practical applications. Especially, drastic improvements of the critical current densities (J_c) and the global pinning forces (F_p) at various temperatures and under magnetic field B are required. At this purpose, the introduction of Artificial Pinning Centers (APCs) in high-temperature superconducting epitaxial films was recognized as highly effective for the pinning of vortices. Several nano-engineering techniques were recently developed to insert and control APCs, and the transport performances of YBCO were dramatically enhanced, by insertion of nanosized dopants especially belonging to perovskite phase BaMO₃ (BMO, M = Zr [1,2], Hf [3], Ir [4], Sn [5,6]).

In this work [6], we present BaSnO₃ (BSO) embedded YBCO films with outstanding pinning performances in comparison with optimized BaZrO₃ (BZO) doped films. YBCO + BZO and YBCO + BSO mixed targets were used in PLD system to form BZO and BSO doped YBCO films, respectively. The dopings of BZO and BSO in YBCO films resulted in the incorporation of extended nanorods in both cases.

2. Experimental procedures

Pure YBCO films were grown for reference by PLD on the SrTiO₃ (STO) single crystals at 800°C. The PLD conditions were: E=340 mJ/pulse, T=800 °C, pO₂=200 mTorr. YBCO + 4 wt% BZO and YBCO + 4 wt% BSO mixed targets were used in PLD system to form BZO and BSO doped YBCO films, respectively following the same procedure used for the reference samples. Crystal phase and the orientations of YBCO films were determined by XRD. The J_c/B characteristics and the angular dependence of J_c varying the angle θ between the c axis of the film and B were measured by PPMS (T=40, 65, 77 K, B=0-7 T). Cross-sections and planar views of films were analyzed by transmission electron microscopy (TEM).

3. Results and discussion

Even if the concentration of dopant and the deposition conditions were the same, TEM analysis reveals that the morphology of nanorods is different. The BZO nanorods are more dense and their diameter is thinner if compared with BSO ones. Furthermore, the BZO nanorods are curved, with a strong deviation from the c -axis crystallographic direction of the film, while the BSO nanorods are almost straight and parallel to c -axis. Accordingly, the top-view TEM micrographs (Fig. 1) show a “fireworks” morphology for BZO nanorods.

The performance of the BSO doped sample is dramatically superior not only to the reference YBCO sample, but also to the BZO doped sample, in the whole range of

temperatures and magnetic field up to 9 T. The BZO doped YBCO shows a remarkable performance with $F_p^{MAX} = 16.3$ GN/m³ (77 K, B//c), almost the same as the typical values of NbTi practical wires at 4.2 K, and $F_p^{MAX} = 52.7$ GN/m³ (65 K, B//c) is achieved. Moreover, the BSO doped sample presents the huge values of 28.3 GN/m³ (77 K, B//c), and 103 GN/m³ (65 K, B//c), almost twice as that of BZO (Fig. 2). Within our knowledge, these values represent the record performance for short samples.

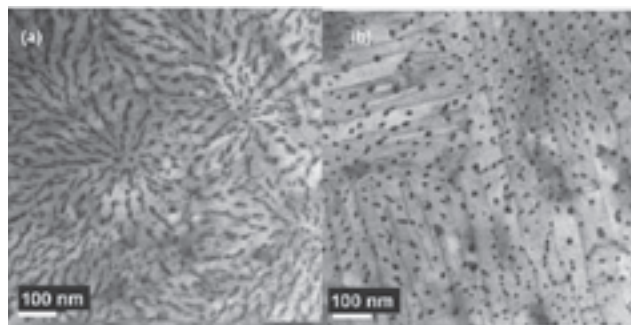


Fig. 1 - Plan-view TEM images of YBCO samples: (a) doped with BZO and (b) doped with BSO.

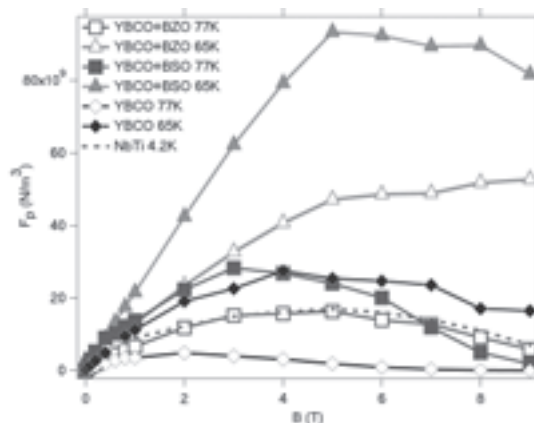


Fig. 2 - F_p versus B (65, 77 K, B//c) for BZO-doped, BSO-doped and pure YBCO films compared with NbTi wires (4.2K, B//c).

Acknowledgement

This work was supported by CREST-JST

References

- [1] J. L. MacManus Driscoll et al., *Nature Mater.* **3**, 439 (2004)
- [2] P. Mele et al., *Supercond. Sci. Tech.* **20**, 244 (2007)
- [3] S. Engel et al., *Appl. Phys. Lett.* **90**, 102505 (2007)
- [4] J. Hanisch et al., *Appl. Phys. Lett.* **86**, 1225081 (2005)
- [5] C. V. Varanasi et al., *J. Appl. Phys.* **102**, 063909 (2007)
- [6] P. Mele et al. *Supercond. Sci. Technol.* **21**, 032002 (2008)

(Y,Ho)Ba₂Cu₃O₇ 膜におけるc軸相関ピンの挙動

c-axis correlated pinning behavior for (Y,Ho)Ba₂Cu₃O₇

淡路 智, 松尾浩幸, 渡辺和雄(東北大金研・強磁場センター)

AWAJI Satoshi, MATSUO Hiroyuki, WATANABE Kazuo (HFLSM, IMR, Tohoku Univ.)

E-mail: awaji@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

c軸相関ピンは異方性の大きい高温超伝導材料の特性改善の鍵となると考えられ、最近様々な方法で coated conductors に導入されている。c軸相関ピンの挙動は、PLD法で作製した REBa₂Cu₃O₇(RE123, RE: 希土類) 膜では古くから、積極的な人工ピン導入を行っていない試料でも見られている[1]。最近では、低温成膜法(LTG)で作製した Sm123 膜でも、同様の挙動が見られている[2]。これらの自然に導入されたc軸相関ピンは主に、刃状転位などの転移転位であると考えられている。しかし、薄膜試料で見られるこれらのc軸相関ピンの挙動は、電気抵抗で見た場合に、バルクのそれに比べると遙かに小さいことがこれまでの我々の研究から分かっている。今回、バルク試料並の顕著なc軸相関ピンの挙動がCVD膜で現れることが分かったので報告する。

2. 実験方法

試料は強磁場 CVD 法により SrTiO₃(STO)基板上に成膜した RE123 薄膜である。RE は Y, Ho それぞれと両方を混合した試料の3種類を作製した。これらの試料に対して、通常の4端子法により、電気抵抗と臨界電流の測定を、磁場と温度および磁場印加角度を変化させて測定した。試料の温度はヘリウムガスフローによって調整した。磁場の印加角度はc軸と平行方向をゼロ度として定義した。

3. 結果と議論

図1は(Y, Ho)123 に対する 77.3K における電気抵抗率の角度依存性である。B//c 方向である $\theta=0^\circ$ に明瞭なディップが現れていることから、c軸相関ピンの存在が伺える。 $\theta=0^\circ$ と $\theta=12^\circ$ の2つの角度における電気抵抗率の温度依存性を図2aに示す。これまで報告されている結果

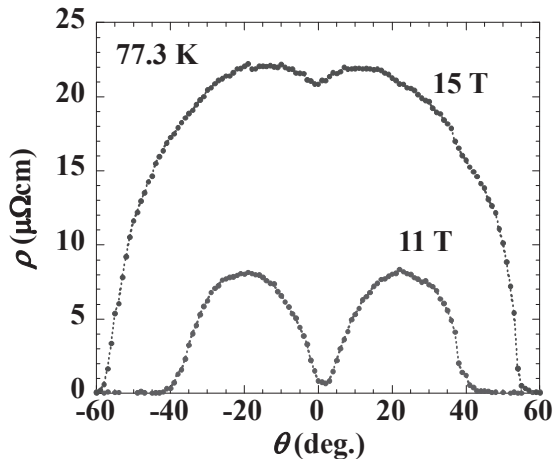


Fig. 1 Angular dependence of resistivity of (Y, Ho)123.

と同様に高温では2つの角度における電気抵抗率はほぼ一致しているが、ある温度以下の低温では両者が大きく異なっていることが分かる。両者の差は、ディップの大きさを反映したパラメータであるので、これらの試料では磁束液体領域において顕著にc軸相関ピンが働いている事を示している。100Kにおける値で規格化した電気抵抗率に対して両者の差をとった値が図2bである。電気抵抗率の差は最大で10%近くに達しており、これまで報告された薄膜試料の値である数%程度よりも非常に大きい事が分かった。この値は、バルクや単結晶で得られている値とほぼ同じであり、薄膜試料でここまで大きいディップが現れたのは初めてであると言える。

Reference

- [1] B. Roas, L. Schultz and G. Saemann-Ichenko, Phys. Rev. Lett. **22** (1990) 479.
- [2] S. Awaji et al., Appl. Phys. Lett., **90** (2007) 12501.

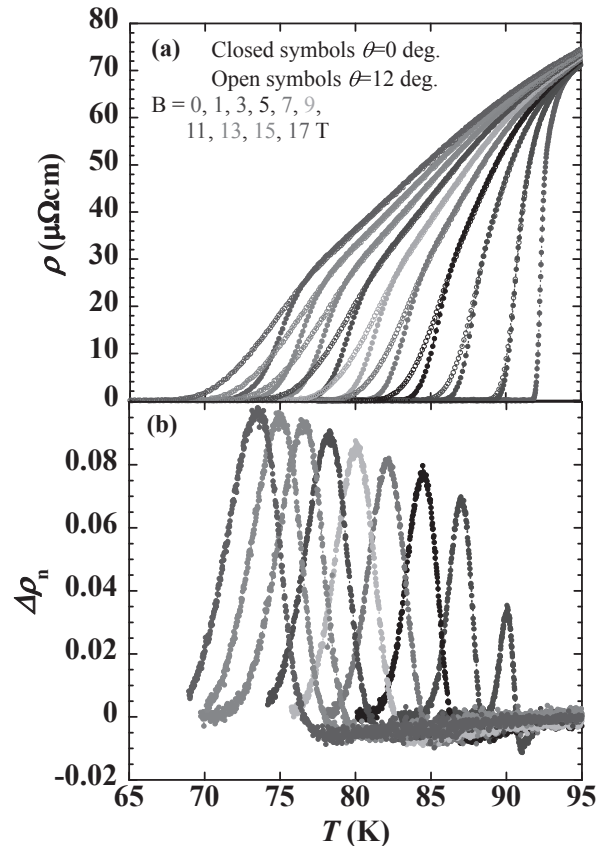


Fig. 2 Temperature dependence of resistivity for $\theta=0^\circ$ and 12° , and resistivity different.

BaZrO₃ ナノロッド導入による VLS-Sm_{1+x}Ba_{2-x}Cu₃O_y 膜の超伝導特性向上Enhancement of superconducting properties in VLS-Sm_{1+x}Ba_{2-x}Cu₃O_y films infused BaZrO₃ nanorods

船木 修平, 吉田 隆, 一野 祐亮, 高井 吉明 (名大工); 松本 要 (九工大工);
一瀬 中 (電中研); 向田 昌志 (九大工); 堀井 滋 (東大工); 喜多 隆介 (静大工)

FUNAKI Shuhei, YOSHIDA Yutaka, ICHINO Yusuke, TAKAI Yoshiaki (Nagoya Univ.);

MATSUMOTO Kaname (Kyushu Inst. Technol.); ICHINOSE Ataru (CRIEPI);

MUKAIDA Masashi (Kyushu Univ.); HORII Shigeru (Univ. of Tokyo); KITA Ryusuke (Shizuoka Univ.)

E-mail: s-funaki@ees.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y(REBCO) 膜の内部に不純物となる BaZrO₃(BZO) ナノロッドを導入することで、磁場中における臨界電流密度(J_c)が飛躍的に向上することが知られている。そのため、BZO ナノロッドのサイズ及び密度、成長機構に関する研究が微細構造観察などを用いて盛んに行われているが、その成長機構については明らかではない[1, 2]。これまで我々は、単結晶育成に近い薄膜成長法である Vapor-Liquid-Solid(VLS)法を用いて作製した Sm_{1+x}Ba_{2-x}Cu₃O_y(V-Sm)膜が高い結晶性及び超伝導特性を示すことを確認してきた[3]。本研究では、BZO ナノロッドの成長機構解明による BZO ナノロッドの制御を目的として、PLD 法よりも広いテラス幅を得ることができる VLS 法を用いて BZO をドーブした SmBCO(V-Sm+BZO)膜を作製した。

2. 実験方法

V-Sm+BZO 膜は、KrF パルスレーザー蒸着法を用いて MgO(100)単結晶基板上に $T_s=950^\circ\text{C}$ 、 $p_{\text{O}_2}=1.0$ Torr で膜厚 200 nm の SmBCO+BZO(2 vol.%) -seed 層を作製し、その上に $T_s=1000^\circ\text{C}$ で Ba₃Cu₇O₁₀-liquid 層を蒸着した後、膜厚 300 nm の SmBCO+BZO(2 vol.%)層を成膜することで作製した。さらに、BZO ナノロッドの成長起点となりうる BZO ナノアイランドで装飾した seed 層上にも作製した(V-Sm+BZO/i)。結晶性及び配向性は X 線回折法、超伝導特性は直流四端子法、表面形状は原子間力顕微鏡(AFM)を用いて評価した。また、Br-MeOH エッチングにより膜内部の BZO ナノロッドの太さ及び密度を評価した。

3. 結果及び考察

REBCO 膜は BZO ナノロッドを導入することで結晶性及び T_c が低下することが報告されている。しかし本研究で作製した V-Sm+BZO 膜の(005)面ロッキングカーブの半値幅は 0.07° と良好であり、 T_c も 90.4 K と高い特性を示した。

Fig. 1 に、V-Sm+BZO 膜及び V-Sm+BZO/i 膜の $B=1$ T における J_c の印加磁場角度依存性を示す。縦軸は $B//ab$ における J_c で規格化した値で、比較として通常の PLD 法で作製した SmBCO(PLD-SmBCO)膜のデータを示す。V-Sm+BZO 膜及び V-Sm+BZO/i 膜は $B//c$ の J_c が $B//ab$ の 1.28 倍、1.40 倍まで増加することがわかる。さらに、 $B=9$ T においても $B//c$ に大きなピークを示すことから、膜内部において c 軸方向に強い異方性を持つ BZO ナノロッドが成長していると考えられる。

Fig. 2 に Br-MeOH を用いてエッチングした V-Sm+BZO 膜及び V-Sm+BZO/i 膜の表面 AFM 像を示す。Br-MeOH は、BZO に比して SmBCO の選択比が高いため、SmBCO のみをエッチングすることができる。

したがって、膜内部における BZO ナノロッドの太さや密度の評価が可能となる。図中における白い粒が BZO ナノロッドを示し、その密度は V-Sm+BZO 膜が $3.3 \times 10^2 /\mu\text{m}^2$ であるのに対し V-Sm+BZO/i 膜は $3.8 \times 10^2 /\mu\text{m}^2$ であった。

以上のことから、V-Sm+BZO/i 膜は、BZO ナノアイランドを起点とした BZO ナノロッドが成長することで密度が増加したため、 $B//c$ 方向におけるピンニング力が向上したと考えられる。また、Br-MeOH エッチングは BZO ナノロッドの太さ及び密度の簡易評価として有効であることを見出した。

4. 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(19676005)の助成を受けて実施されたものである。

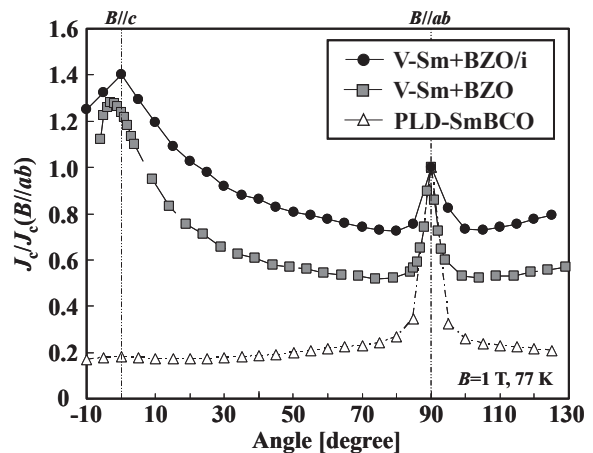


Fig. 1 Magnetic field angular dependence of J_c for various SmBCO films.

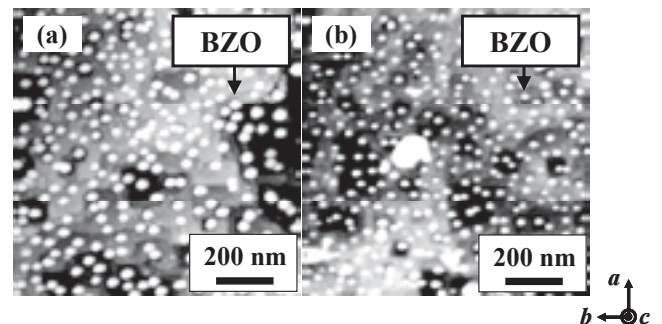


Fig. 2 Surface morphology of etched (a) V-Sm+BZO film and (b) V-Sm+BZO/i film.

【参考文献】

- [1] J. L. Macmanus-Driscoll et al., Nature 3 (2004) 439-443.
[2] S. Kang et al., Science 311 (2006) 1911.
[3] Y. Ichino et al., Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 45 No. 2A (2006) 758-760.

GdBCO+ZrO₂ コート線材の臨界電流密度の印加磁界角度依存性

Angular dependence of critical current density in GdBCO+ZrO₂ coated conductor

木内 勝, 姫木携造, 小田部荘司, 松下照男 (九工大); 宮田成紀, 衣斐 顕, 山田 穰, 塩原 融 (SRL)
 KIUCHI Masaru, HIMEKI Keizou, OTABE Edmund Soji, MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. Tech.);
 MIYATA Seiki, IBI Akira, YAMADA Yutaka, SHIOHARA Yuh (SRL)
 E-mail:kiuchi@cse.kyutech.ac.jp

1. はじめに

高温高磁界領域においても優れた臨界電流特性を持つ RE 系コート線材の精力的な開発が行われているが、磁界をテープ面に対して垂直に加えた場合の臨界電流密度が低いことからその特性改善が求められる。その磁界方向の臨界電流密度の向上には柱状欠陥などの強いピンの導入が有効であることから、様々な試みがなされている。特に PLD (Pulsed Laser Deposition) の成膜時に GdBCO + ZrO₂ のターゲットを用いることにより nano-rod 状の強いピンが導入され、臨界電流密度が大きく向上することが報告されている。したがって、今後の更なる特性改善のためにもどのような機構により臨界電流密度の向上がもたらされているのかを詳細に調べる必要がある。

ここでは、強いピンが導入された GdBCO + ZrO₂ コート線材の印加磁界角度依存性を測定し、その結果を磁束クリープ・フローモデルの解析と比較し、nano-rod 欠陥のピンニング特性を調べる。

2. 実験

測定試料は IBAD 法で作製された Hastelloy 基板上に GZO 及び CeO₂ を堆積させ、その上に GdBCO + ZrO₂ のターゲットを用いて PLD で成膜した Gd コート線材である。超電導体の厚さは 1.2 μm である。臨界電流密度の測定には直流四端子法を用いた。また、試料に加える磁界はテープ面に平行方向を 0°、テープ面に垂直な方向を 90°とした。臨界電流密度は $E_c = 1.0 \times 10^{-3}$ V/m で決定した。尚、抵抗率の温度依存性から求めた臨界温度は 91.2 K だった。

3. 結果及び検討

Fig. 1 に 77.3 K における臨界電流密度の印加磁界角度依存性を示す。1 T では垂直磁界下の臨界電流密度は平行磁界下の臨界電流密度より大きく、強いピンが導入されていることがわかる。また、3 T においてもほとんど磁界方向に依存しないフラットな特性になっており、これは nano-rod 欠陥の方位が c 軸方向からある程度広がって分布しているためであると考えられる。同様な手法で作製されたコート線材の TEM 画像から、nano-rod 欠陥が c 軸方向から数~数十°ずれていることが確認できる [1]。

この nano-rod 欠陥の方位と c 軸方向のずれがどのように臨界電流密度に影響を与えるかを調べるために、磁束クリープ・フローモデルを用いて解析を行った。ここではバックグラウンドの点状ピンに超電導体の異方性の影響を考慮し、これと導入された nano-rod 欠陥による異方性の効果を重畳した。具体的には欠陥の c 軸方向からのずれを正規分布で表し、そのずれが面内で一様に分布していると仮定した。さらに、その欠陥が一本の磁束線と相互作用する体積から要素的ピン力の印加磁界角度依存性すなわち異方性の効果を考慮して、理論的に臨界電

流密度を求めた。Fig. 2 に c 軸方向からのずれを HWHM = 20°とした場合の臨界電流密度の印加磁界角度依存性に示す。50°近傍で J_c の緩やかな減少はあるが定性的に一致した結果が得られた。なお、この減少は nano-rod 欠陥の c 軸方向からのずれは、解析に用いた HWHM = 20°程度でなく、もっと幅広く分布していること示唆するものである。

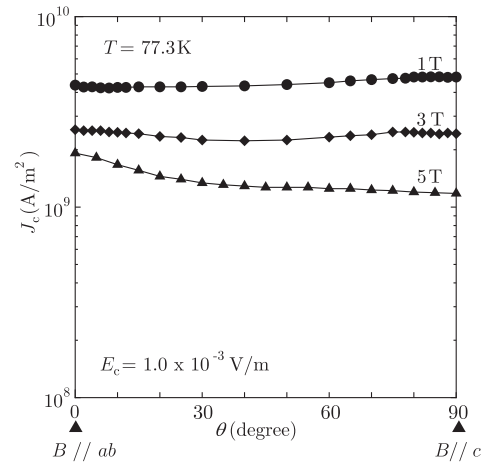


Fig. 1: Angular dependence of critical current density at 77.3 K.

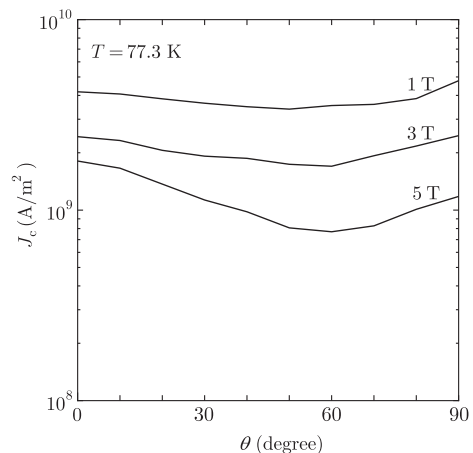


Fig. 2: Theoretical result predicted by the flux creep-flow model.

謝辞 本研究は、超電導応用基盤技術開発の一環として、ISTEC を通じて NEDO から委託を受けて実施したものである。

参考文献

- [1] K. Takahashi *et al.* Supercond. Sci. Technol. 19 (2006) 924.

Y系線材用 Ni めっき配向 Cu テープの配向度と磁性

Crystal orientation and magnetic property of Ni-electroplated textured Cu tape for coated conductors

土井 俊哉、富安 亮太、徳留 誠、白樂 善則(鹿児島大);

嶋 邦弘、窪田 秀一(田中貴金属工業);鹿島 直二、長屋 重夫(中部電力)

DOI Toshiya, TOMIYASU Ryota, TOKUDOME Makoto, HAKURAKU Yoshinori (Kagoshima University); SHIMA Kunihiro, KUBOTA Shuichi (TANAKA Kikinzoku Kogyo K.K.); KASHIMA Naoji, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co.)

E-mail: doi@eee.kagoshima-u.ac.jp

1. はじめに

配向金属基板上に Y 系超伝導線材を作製する場合、これまで Ni もしくは Ni-W 合金テープが基体テープに用いられてきた。しかし、Ni や Ni-W 合金は強磁性であるために交流電流通電時に大きな損失が発生してしまい、実用性に問題があった。そこで我々は、非磁性(反磁性体)である Cu を Y 系超伝導線材の基板テープとして開発を行ってきた。

Cu は代表的な FCC 金属であり、冷間圧延と熱処理によって容易に[100]×[001]集合組織を得ることができる。また Cu は Ni に比べて大幅に素材コストを低減できる。

Cu テープを基板とした場合、YBCO 層や中間層を形成する際に Cu テープと中間層の界面で厚い酸化銅層が形成され、中間層が Cu テープから剥離してしまうことが問題となっていた。そのためには酸素を透過させない中間層を必要とし、スパッタリング法で形成した Ni 層が酸素拡散防止層として有効に働くことが報告されている。しかしながら、長尺テープのプロセスコスト低減のためにはめっき法で Ni 層を形成することが好ましく、多くの報告がされているが、Ni めっき層上に良質の中間層、YBCO 層を作製した例は無い。

我々は良好な配向を有する Ni めっき Cu テープを開発したので、その結晶配向性とテープの持つ磁性について報告する。

2. 試料および実験方法

配向 Cu テープは冷間圧延と熱処理によって作製し、その上にめっき法で 500nm 厚の Ni 層を形成した。Ni めっき層および Cu テープの配向性は θ - 2θ 法による X 線回折測定(XRD)および極点図測定を行った。また、試料表面粗さは走査電子顕微鏡(SEM)および原子間力顕微鏡(AFM)を用いて評価した。

また、Ni めっき Cu テープと 700°C で 1 時間熱処理した Ni めっき Cu テープの磁化の磁場依存性を 77K で測定した。

3. 結果と考察

冷間圧延後に熱処理を施した Cu テープの極点図測定を行ったところ、良好な[100]×[001]集合組織が得られていることが確認できた。また、 ϕ スキャン測定、 ω スキャン測定のピーク半値幅は 4.6 度、4.6 度と非常に高い配向度を有していることが分かった。この Cu テープの表面を研磨した後、めっき法で形成した Ni 層の極点図測定を行ったところ、Ni

層は Cu テープ上に綺麗にエピタキシャル成長していることが確認できた。また、 ϕ スキャン測定、 ω スキャン測定のピーク半値幅は 4.5 度、5.3 度と非常に良好であった。

Ni めっき Cu テープは Ni めっき層が存在するために弱い強磁性を示すことが予想されるが、強磁性の存在は超伝導線材にとって好ましいことではない。そこで、Cu と Ni が容易に合金を形成すること、及び低濃度 Ni の Cu 合金は常磁性体となることに着目して、短時間の熱処理で Ni めっき層を Cu テープ中に拡散させて、テープを常磁性とすることを試みた。Fig.1 に、熱処理前と熱処理後の Ni めっき Cu テープの 77K で測定した $M-H$ 曲線を示す。図中には、純 Ni、SUS304 及びハステロイテープの測定結果も併せて示した。熱処理前の Ni めっき Cu テープの飽和磁化及び磁化率は純 Ni テープの約 1/100 であり、ほぼ Ni 厚さそのものに比例している。一方、700°C で 1 時間熱処理した Ni めっき Cu テープは常磁性的な $M-H$ 曲線で、磁化率もハステロイ C とほぼ同じであった。以上のことから、中間層および YBCO 層の形成過程、およびその後の短時間の追加熱処理を行うことで 500nm 厚さの Ni は Cu 中に拡散してしまい、Ni めっき Cu テープは非磁性化(常磁性化)できることが分かった。

以上の結果から、Ni めっき Cu テープは Y 系超伝導線材にとっての理想的な基材テープであることが分かった。

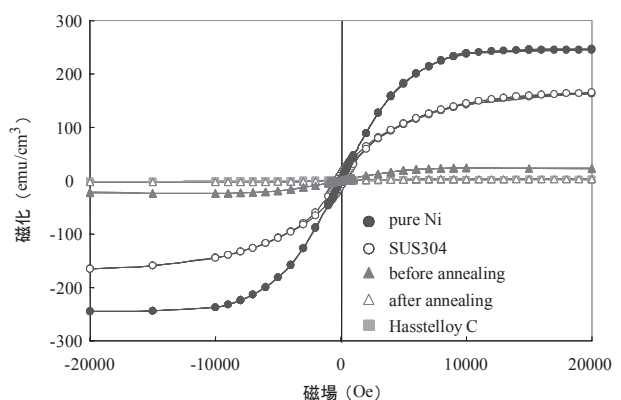


Fig.1 $M-H$ curves for the Ni-electroplated Cu tapes before and after annealing, pure Ni, SUS304 and hastelloy tapes. The measurements were performed at 77K and the magnetic fields were applied perpendicular to the tape surfaces.

配向 Cu テープ上への 2 軸配向 YBCO 薄膜の作製と J_c - B 特性Preparation of biaxially oriented YBCO thin films on textured Cu tapes and their J_c - B characteristics

土井 俊哉、富安 亮太、徳留 誠、白樂 善則(鹿児島大学);

嶋 邦弘、窪田 秀一(田中貴金属工業); 鹿島 直二、長屋 重夫(中部電力)

DOI Toshiya, TOMIYASU Ryota, TOKUDOME Makoto, HAKURAKU Yoshinori (Kagoshima University); SHIMA Kunihiko,

KUBOTA Shuichi (TANAKA Kikinzoku Kogyo K.K.); KASHIMA Naoji, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co.)

E-mail: doi@eee.kagoshima-u.ac.jp

1. はじめに

Y 系超伝導線材の基材テープには、配向金属テープを使う手法と、無配向金属テープ上に IBAD 法により配向中間層を形成する手法が用いられている。現在、国内では IBAD 法を中心に開発が進められているが、低コスト化を考えた時には配向金属テープは熱処理のみで作製できるので魅力的である。これまで Ni もしくは Ni-W 合金テープが基体テープに用いられてきたが、Ni や Ni-W 合金は強磁性であるために交流電流通電時に大きな損失が発生してしまい、実用性に問題があった。そこで今回我々は、非磁性(反磁性体)である Cu を Y 系超伝導線材の基板テープとして開発してきた。

Cu は代表的な FCC 金属であり、冷間圧延と熱処理によって容易に{100}<001>集合組織を得ることができる。また Cu は Ni に比べて大幅に素材コストを低減できる。

Cu テープを基板とした場合、YBCO 層や中間層を形成する際に Cu テープと中間層の界面で厚い酸化銅層が形成され、中間層が Cu テープから剥離してしまうことが問題となっていた。そのためには酸素を透過させない中間層を必要とし、スパッタリング法で形成した Ni 層が酸素拡散防止層として有効に働くことが報告されている。しかしながら、長尺テープのプロセスコスト低減のためにはめっき法で Ni 層を形成することが好ましく、多くの報告がされているが、Ni めっき層上に良質の中間層、YBCO 層を作製した例は無い。

今回我々は良好な配向を有する Ni めっき Cu テープを開発し、その上に $\text{CeO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2$ 中間層を形成して高配向の YBCO 層を得て、77K、自己磁場中で $J_c=4.5\text{MA}/\text{cm}^2$ と非常に高い特性を得ることに成功した。

2. 試料および実験方法

配向 Cu テープは冷間圧延と熱処理によって作製し、その上にめっきで Ni 層を形成した。この Ni めっき層上に PLD 法を用いて $\text{CeO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2$ 層を形成し、その上に YBCO 膜を PLD 法で作製した。

CeO_2 、YSZ、YBCO 薄膜の配向性を確認するために θ - 2θ 法による X 線回折測定(XRD)および極点図測定を行った。また、試料表面については走査電子顕微鏡(SEM)を用いて観察した。試料の臨界電流密度(J_c)、臨界温度(T_c)は直流四端子通電法で測定した。

3. 結果と考察

Fig.1 に Ni 層をめっきで形成した Cu テープ上に、 $\text{CeO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2$ 中間層を形成し、その上に作製した YBCO 膜の(103)の極点図を示す。 $\alpha=45^\circ$ のとき、 β 角が 0° から 90° おきにピークが確認でき、良好な 2 軸配向膜であることが分かった。また、 ϕ スキャン測定、 ω スキャン測定のピーク半値幅は 4.2 度、3.3 度と非常に高い配向度を有していることが分かった。直流 4 端子法で測定したところ $T_c=88.5\text{K}$ 、77K、自己磁場中の臨界電流密度は $J_c=4.5\text{MA}/\text{cm}^2$ と非常に高い値が得られた。YBCO の c 軸に平衡方向に磁場を印加すると、弱磁場での急激な J_c の低下は観測されないことから、良好な粒界接合性が確保できていることが確認できた。

以上のことから、Ni めっき Cu テープは、非磁性(常磁性)、低コスト、高配向であり、Y 系超伝導線材用の非常に優れた基体テープであること、また、YBCO/ $\text{CeO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2/\text{Ni}/\text{Cu}$ テープは非常に有望な Y 系線材であることが分かった。

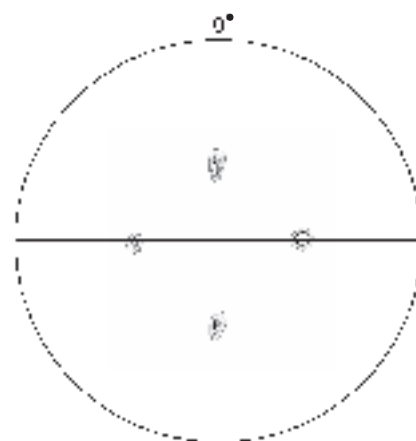


Fig.1 X-ray (103) pole figure of the YBCO deposited on the $\text{CeO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2/\text{Ni}/\text{Cu}$ substrate.

低磁性基板を用いた中間層の開発

Development of buffer layer on low magnetic substrate

太田肇, 小西昌也, 新海優樹, 永石竜起, 種子田賢宏, 本田元気, 加藤武志 (住友電気)

OTA Hajime, KONISHI Masaya, SHINGAI Yu ki, NAGAIISHI Tatsuoki, TANEDA Takahiro, HONDA Genki, KATO Takeshi (SEI)

E-mail: ota-hajime@sei.co.jp

1. はじめに

超電導マグネットや超電導ケーブル等の電力機器用途への適用を目指して RE-123 (RE: 希土類元素) 系の薄膜超電導線材の開発を進めている。Ni 合金配向金属基板上において 200m 長で 200A/cm-width の臨界電流が 77.3K で得られるようになってきた。しかし、交流応用に使用するには配向金属基板の磁性を低減させる必要がある。

これを解決する手段の一つとして、配向金属基板のクラッド化の開発を進めた結果、低磁性クラッド配向金属基板のヒステリシス損失量は Ni 合金配向金属基板に対して 1/25 へ減少し、通電損失は非磁性基板と同程度の交流損失を確認した。臨界電流特性は、約 160A/cm-width を短尺材で確認した。

今回、クラッド化により低磁性化した配向金属基板を用いた中間層開発の進捗および中間層の高速成膜化について報告する。

2. 実験方法

低磁性クラッド配向金属基板を用いて、その上にエピタキシャル成長する CeO₂/YSZ/CeO₂ 構造となる三層中間層をスパッタ法により成膜した。また、スパッタの各種条件検討を実施し、膜厚を従来成膜速度時から変化させない条件で成膜速度増加検討を実施した。特性評価のため、成膜した各層の表面粗さ (Ra) および面内配向度 ($\Delta\phi$) を測定した。中間層の上に RE-123 超電導層および安定化層を成膜し、線材を得た。得られた線材の臨界電流 (I_c) を測定した。通電特性は全て直流四端子法で測定し、I_c の定義には、1.0 μ V/cm を用いた。

3. 実験結果と考察

低磁性クラッド配向金属基板上に平均成膜速度 7m/h で成膜した中間層の表面粗さ (Ra) は約 20nm、面内配向度 ($\Delta\phi$) は約 6° であった。臨界電流特性は 259A/cm-width、臨界電流密度は 2MA/cm² へと大きく向上し、短尺材において Ni 合金配向金属基板とほぼ同等の特性を得ることができた。

高速成膜化における成膜速度と中間層各層の表面粗さ (Ra)、面内配向性 ($\Delta\phi$) の関係をそれぞれ Fig.1、Fig.2 に示す。成

膜速度増加による特性悪化は見られず、Ra は約 20nm、 $\Delta\phi$ は約 7° であり、従来成膜速度時とほぼ同じ膜厚で平均成膜速度 20m/h を実現した。

表面粗さ (Ra)、面内配向性 ($\Delta\phi$) とともに成膜速度に対する依存性は認められず、また、膜厚も従来成膜速度時とほぼ同じであることから、平均成膜速度 20m/h で高速成膜した中間層を使用した超電導線材において、従来の平均成膜速度 7m/h で成膜したものと同等の臨界電流特性が得られると期待でき、今後、確認していく。

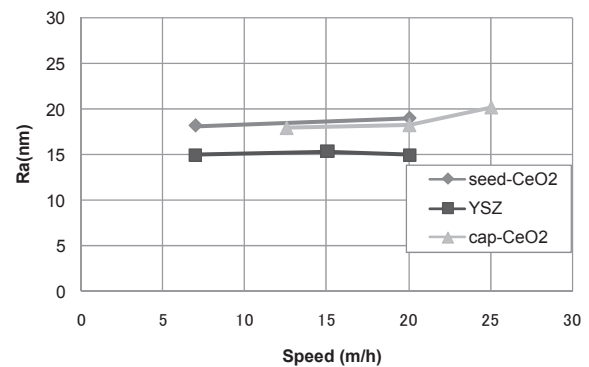


Fig. 1 Relation between speed and surface roughness (Ra).

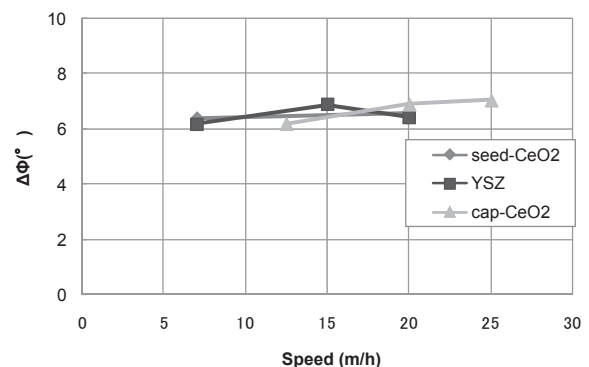


Fig. 2 Relation between speed and in-plane alignment ($\Delta\Phi$).

謝辞

本研究の一部は超電導応用基盤技術研究体の研究として、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託を受けて実施したものである。

配向金属基板を用いた超電導線の開発

Development of superconducting wires on textured metal substrates

新海 優樹, 永石 竜起, 母倉修司, 小西 昌也, 太田 肇, 種子田 賢宏, 本田元気, 加藤 武志 (住友電工)
 SHINGAI Yuki, NAGAISHI Tatsuoki, HAHAKURA Shuji, KONISHI Masaya, OTA Hajime,
 TANEDA Takahiro, HONDA Genki, KATO Takeshi (SEI)
 E-mail: shingai-yuuki@sei.co.jp

1. はじめに

我々は、送電ケーブルや高磁場用コイルに向け $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (RE: rare earth elements) 系超電導線材の開発を行っている。超電導層の成膜に使用している PLD 法は、製造速度を上げることにより成膜コストの低減を行うことが重要である。

製造速度を上げる方法は大きく分けて、成膜レートの向上と臨界電流密度 (J_c) を上げるという 2 つの方法が考えられる。そこで今回は成膜レートの向上を目的とした成膜条件の検討を行った。目標は「200A/cm-width@2m/h」から「200A/cm-width@4m/h」に引き上げることとした。また、低コスト化、低交流損失化を狙った低磁性配向金属基板(クラッドタイプ)上への超電導線材開発状況についてもあわせて報告する。

2. 実験方法

配向金属基板には Ni 合金とクラッドタイプを用いた。中間層は RF スパッタリング法により成膜した。またその構造は基板側より種層が CeO_2 (~100nm)、拡散防止層が YSZ (~300nm)、キャップ層が CeO_2 (~100nm) という 3 層構造になっている。超電導層として $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (RE-123) を用い PLD 法により成膜した。成膜後、酸素中アニールを行うことにより超電導特性を確保した。

作製した、超電導線材は配向性を XRD $\theta/2\theta$ 、面内配向性を XRD ϕ -scan により観察した。臨界電流 (I_c) を直流 4 端子法により Ag 層を蒸着したサンプルを用いて測定し、臨界温度 (T_c) を誘導法により測定した。また、表面を SEM、AFM により、断面を FE-SEM により観察した。組成は EDX により評価した。

3. 結果と考察

最初にターゲット-基板間距離 (dts)、酸素圧力と成膜レートの関係について調査した。その結果酸素圧力を下げることにより成膜レートがあがり、dts を小さくすることによっても上がることがわかった。また、成膜レートと dts の相関は酸素圧力が小さいほど強い相関を示した。これは酸素圧力が高いとアブレートされた粒子の平均自由行程が短くなるためだと考えられる。ただし、dts が十分小さければ高酸素圧力においても相関は強くなると考えている。

次にレーザー発振周波数と成膜レートについて調べた。その結果周波数を上げることによりほぼリニアに成膜レートが上がることが分かった。これらの結果から酸素圧力と dts を下げ、発振周波数を上げ、Gd-123 の成膜を行った。その結果、従来条件と比べて成膜レートは約 2 倍に向上した。この成膜条件において Ni 合金配向金属基板上に Gd-123 を成膜したところ短尺で $I_c = 315\text{A/cm-width@4m/h}$ を得た。またこの条件で 5.5m ごとに短尺サンプルを配置した全長 50m のパッチ試験を行ったところ、図 1 に示すように全サンプルの I_c 値が成膜速度 4m/h で 200A/cm-width を越える特性を得た。

また、20m のクラッドタイプ配向金属基板を用いた超電導線材の I_c 測定結果を図 2 示す。 I_c は Ni 合金配向金属上に比べ低いながらもほぼ均一な I_c 分布をもっていることが分かる。現在、成膜条件の最適化を行うことにより短尺で $I_c = 259\text{A/cm-width@4m/h}$ の特性を得ている。今後は長尺材の高 I_c 化を行う。

4. 結論

成膜レートの向上を目的とし超電導層成膜条件の検討を行った。その結果、酸素圧力を下げ dts を小さくすることにより成膜レートの向上が見いだされた。最適化した条件で Gd-123 を成膜した結果、 $315\text{A/cm-width@4m/h}$ の特性を持つ膜を得た。また 50m パッチ試験を行ったところ、全てのサンプルで 4m/h、200A/cm-width 以上の I_c を得た。またクラッドタイプ基板上では $I_c = 259\text{A/cm-width@4m/h}$ を得た。

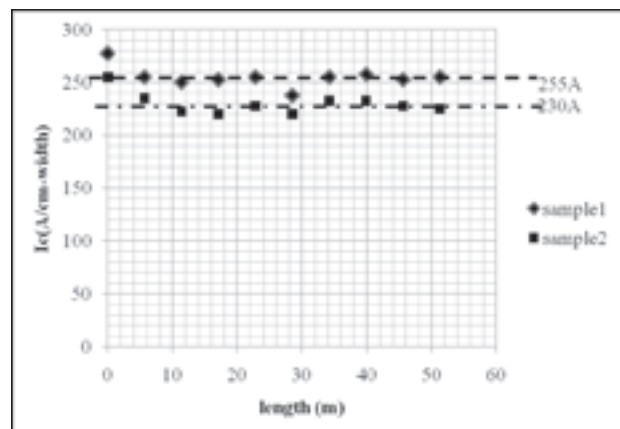
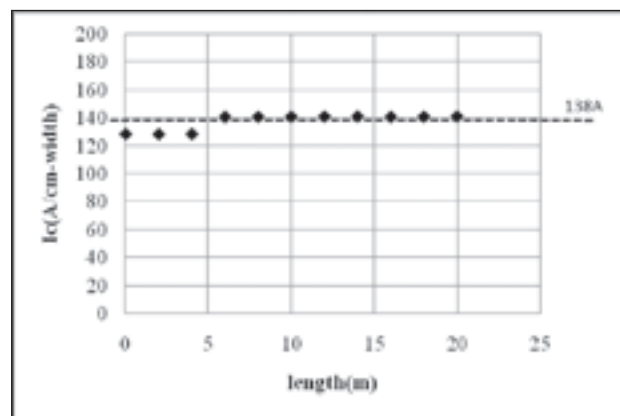


Fig.1 Results of 50m patch tests

Fig.2 An I_c distribution of a 20m coated conductor grown on a clad type substrate.

謝辞

本研究の一部は超電導応用基盤技術研究体の研究として、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託を受けて実施したものである。

MOCVD-YBCO 導体を用いた SMES コイルの最適設計手法開発のまとめ

Overview of Development of Optimal Design Method for SMES Coil Using MOCVD-YBCO Conductor

東川 甲平 (九大); 中村 武恒, 菅野未知央 (京大); 式町 浩二, 平野 直樹, 長屋 重夫 (中部電力);

柁川 一弘, 船木 和夫 (九大)

HIGASHIKAWA Kohei (Kyushu Univ.); NAKAMURA Taketsune, SUGANO Michinaka (Kyoto Univ.); SHIKIMACHI Koji, HIRANO Naoki,

NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co., Inc.); KAJIKAWA Kazuhiro, FUNAKI Kazuo (Kyushu Univ.)

E-mail: kohei@super.ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに 高温超電導 (HTS) 機器の概念設計においては、HTS 線材の電流輸送特性・機械特性・交流損失などの中で機器ごとにクリティカルとなる項目を中心に検討されることが多い。一方、SMES 用のコイルに関しては、高磁界・高応力・高速充放電運転と複合的に厳しい環境にさらされるため、上記項目の全てが同コイルの成立性に影響を及ぼす。従って、そのように複雑な条件下でコイル構成・形状を直感的に決定することはもはや困難であり、最適設計手法の確立が特に重要な課題となる。そこで本発表では、NEDO の委託事業「超電導電力ネットワーク制御技術開発」の一環として開発してきた MOCVD-YBCO 線材を用いた電力系統制御用 SMES コイルの最適設計手法の概要について報告する。

2. 目的 本設計手法の目的としては、使用線材長の最小化を採用している。これは、コイルの製作コスト低減に相当するものであるが、現段階では必要線材長やコイル体格の目安を得て実現可能性を検討するといった意味合いの方が強い。

3. 考慮すべき線材の特性 超電導コイルの設計ということで、線材の臨界電流特性を考慮することは必須となる。ただし、特に高温超電導コイルの場合には、その温度・磁界・磁界印加角度依存性まで考慮すべきである。また、目指すべき高磁界 SMES コイルでは、線材に高応力が働くため、その際の臨界電流の変化(ただし可逆)、すなわち臨界電流の機械ひずみ依存性^[1]まで考慮する必要がある^[2]。さらに、臨界電流は一般に電界基準で定義されるが、同じ臨界電流でも n 値によっては特性が様々となるため、電流密度・電界 ($J-E$) 特性に関して温度・磁界・磁界印加角度・機械ひずみ依存性を考慮するのが妥当である。以上は直流通電特性に関するものであるが、特に充放電機会の多い SMES コイルでは、線材の交流損失がその成立性を左右する。また、充放電運転パターンの性質上、交流成分に加えて直流成分が存在するため、その影響まで把握しておく必要がある^[3]。本設計手法では、以上の全てを考慮している。

4. 制約条件 線材に関する様々な特性を設計に反映していく中で、少なくとも以下の制約条件が必要になることがわかった。

「最大蓄積エネルギー待機運転時」

条件 (I): 最大電界 (例えば $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 以下)

条件 (II): 全フロー損 (例えば 100 W 以下)

条件 (III): 最大フープ応力 (例えば 1 GPa 以下)

「充放電運転時」

条件 (IV): 交流損失 (例えば 10 kW 以下)

全て当然制約すべき項目ではあるが、SMES コイルの設計においては、ある制約条件での最適設計の結果が、その他の制約条件を自動的に満たす可能性が低いということに注意を要する。従って、上記の全てを予め最適化の際の制約条件として含めておくことが、同コイルの設計においては特に重要となる。

5. 設計変数 まず、コイル構成・形状を表現するために必要な変数が挙げられる。例えば、ここで検討するトロイダルコイル^[4]では、要素コイルの数・中心半径・内半径・外半径・高さとなる^[5]。また、本設計手法においては、ターン間距離^[6]を設計変数に含

めることで、必要かつ最適な補強層厚を評価する手法を採用している。

6. 最適化手法 設計変数の多さから総当り的なコイル構成・形状の検討は困難となるため、最適化手法の採用が前提となる。また、線材の超電導特性と制約条件との兼ね合いから局所的最適解が存在することもわかっており、大域的最適化手法の適用が望まれる。本設計手法では、そのような最適化手法の中で遺伝アルゴリズムを採用している。

7. まとめ・今後の展開 一例として、MOCVD-YBCO 線材を用いた 20 K 運転 2.4 GJ 負荷変動補償用 SMES コイルの設計結果を Fig. 1 に示す。このように、臨界電流・フロー損・機械的応力・交流損失などの様々な観点から破綻することのないコイル構成・形状を探し出すことが可能となる。今後は、別途検討されているコイルの伝熱特性^[7]・冷凍機のパフォーマンス・電力変換器の構成から定まる制約条件を追加するなど、詳細設計手法に発展させていく予定である。

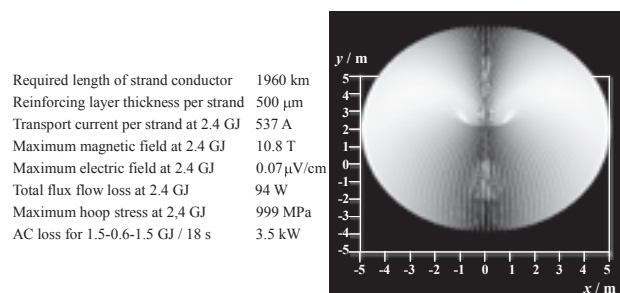


Fig. 1. Design example of MOCVD-YBCO SMES coil for load fluctuation compensation. The capacity of stored energy is 2.4 GJ , and the operating temperature is 20 K .

謝辞 本研究は、NEDO の委託事業「超電導電力ネットワーク制御技術開発」の一環で実施したものである。なお、本研究に用いた YBCO 線材は、超電導応用基盤技術研究開発業務の一環として、ISTEC を通じて NEDO の委託により中部電力が製作したものである。また、高温超電導コイルの設計コードは、科学研究費補助金(特別研究員奨励費、課題番号:18・2788)による助成を受けて開発したものである。

参考文献

- [1] M. Sugano et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 17, no. 2 (2007) pp. 3067-3070.
- [2] K. Higashikawa et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., accepted for publication (presented at MT20).
- [3] K. Higashikawa et al.: The 2008 Annual Meeting Record IEE Japan, no. 5 (2008) p. 229.
- [4] S. Noguchi et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 15, no. 2 (2005) pp. 1927-1930.
- [5] K. Higashikawa et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 17, no. 2 (2007) pp. 1990-1993.
- [6] K. Higashikawa et al.: Abstracts of CSJ Conference, vol. 75 (2006) p. 136.
- [7] T. Manabe et al.: The 2008 Annual Meeting Record IEE Japan, no. 5 (2008) p. 230.

設計手法を用いて推定した機器定数による超電導変圧器の励磁突入電流解析

Inrush current simulation of superconducting transformer using machine parameter estimated by design method

徳永 義孝, 阿部 実(東京電力); 林 秀美(九州電力)

TOKUNAGA Yoshitaka, ABE Minoru (Tokyo Electric Power Company); HAYASHI Hidemi (Kyushu Electric Power Co., Inc.)

E-mail: tokunaga.yoshitaka@tepco.co.jp

1. はじめに

現在の電力系統において、需要家設備の変圧器(常電導変圧器)を投入するとき生じる励磁突入電流による障害があり、電圧変動や高調波の発生といった他の需要家の電力品質へ与える影響を解析する必要がある[1]。ところが、需要家の設備を対象とする場合、解析に必要な機器定数の入手が大変困難な状況になっている。この課題を解決するため、一般に得られる銘板値から機器定数を推定できる方法の開発を行っている[2]。また、この課題は将来的に超電導変圧器が実系統に導入される場合にも発生することが予想される。そこで超電導変圧器に対しても機器定数が推定できることを目的とし、常電導変圧器用に開発している機器定数推定方法を適用し、得られた機器定数を用いて励磁突入電流をEMTP(ATP)により解析し、測定結果との比較を行った。

2. 設計手法を用いた常電導変圧器の機器定数推定方法[2]

需要家設備で現在多く稼働している二巻線変圧器に対し、竹内氏の著作[3]に掲載の設計手法ならびに設計例に準じて機器定数の推定を試みている。銘板値(定格容量, 定格電圧, 相数, %インピーダンス, 周波数)を出発点とし、定格磁束, 磁束密度, 電流密度, 平均的な絶縁部分の厚さを定数として設定する。また巻線高さ当たりのアンペア・ターン値, 電線の断面寸法, 鉄心・巻線間距離, 巻線間距離の値を変数として初期値を設定する。巻線の巻数, 鉄心・巻線の寸法を順に算出した後に導出できる巻線抵抗値(高圧側, 低圧側), 漏れインダクタンス値を用いて%インピーダンスを算出する。変数の値を変化させて計算を行い、次の条件を満足した段階で、励磁突入電流を解析するのに必須である空心インダクタンス値, 磁気飽和特性をさらに導出する。

(1) 算出した%インピーダンスが銘板値と一致すること。

(2) 高圧・低圧両巻線が鉄心窓内に収まる寸法となること。

以上の手順を機器定数推定法とした。

3. 超電導変圧器に対する機器定数推定

2. の機器定数推定方法を適用して超電導変圧器の機器定数推定を試みた。対象器は以下の条件で選定した。

(1) 実系統に連系した経験がある。

(2) 励磁突入電流の測定結果を有する。

(3) 需要家設備の規模に相当する容量である。

その結果、九州電力の今宿変電所にて系統連系試験が行われた 1000kVA 変圧器を対象とした[4]。この銘板値に相当するデータを Table 1 に示す。また本器に対して公表されている定格磁束密度(1.6T) や高・低圧側の巻数(高圧: 2, 低圧: 4)[5], 各種文献などから想定した巻線断面寸法, 電流密度を定数とした。これらのデータをもとに機器定数の推定を行い、解析に必要な機器定数を得ることができた。特に空心インダクタンス値については 0.119 H と導出できた。

4. 励磁突入電流の解析

対象器を高圧(22kV)側から投入したときの測定結果波形はFig.1の通り得られている[4]。この波形から残留磁束ならびに投入位相を導出し、3. で得た機器定数の推定値を用いて22kV側の電圧, 電流をEMTP(ATP)により解析した。結果を

Fig.2に示す。Fig.1と類似した波形が得られることがわかった。電流波高値の最大値は測定値が289Aに対し、解析値は283Aとなり、実用上は測定結果をほぼ再現できたと考えられる。

Table 1 Nameplate data of SC transformer at field test

Rated capacity	1000kVA
Rated voltage (High, primary)	22kV
Rated voltage (Low, secondary)	6.9kV
Number of phase	1
%impedance	5.0%
Frequency	60Hz

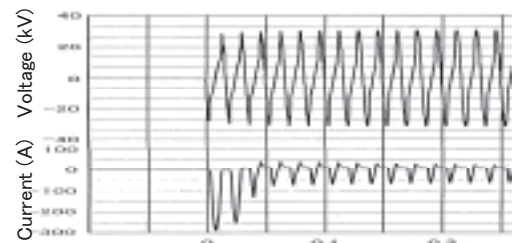


Fig.1 Measured waveforms of primary voltage and inrush current

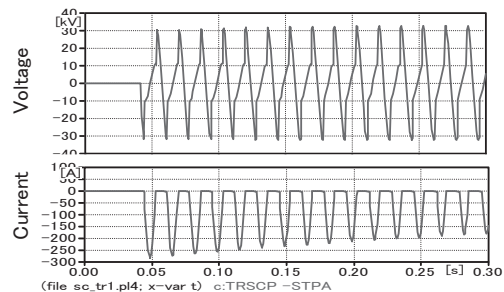


Fig.2 EMTP-ATP simulated waveforms of primary voltage and inrush current

5. まとめ

本稿では超電導変圧器の実機を対象に、常電導変圧器用に開発している機器定数推定方法の適用を試み、得られた値を用いて励磁突入電流のEMTP(ATP)解析を行った。解析結果からは実機での測定結果を実用上はほぼ再現できることがわかった。今後、本方法を各種の変圧器に対して適用検証し、実用性を高めていきたいと考えている。

参考文献

- 徳永: 神電協時報, 129号(2008)p.199
- Y. Tokunaga and K. Kubota: The Papers of Joint Technical Meeting on Power Engineering and Power System Engineering, IEE Japan, PE-07-71/PSE-07-86(2007)
- 竹内:「電気機器設計学」, オーム社(1953)
- 九州電力総合研究所パンフレット「超電導変圧器の系統連系試験」
- SUPERCONDUCTIVITY COMMUNICATIONS, Vol. 9, No. 3, Jun. (2000), <http://semrl.t.u-tokyo.ac.jp/supercom/>

高温超電導線材の放射化実験

Radioactive analyses of HTS conductors

植田 浩史, 石山 敦士(早大); 鹿島 直二, 長屋 重夫(中部電力); 宮原 信幸(放医研)

UEDA Hiroshi, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University);

KASHIMA Naoji, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Company); MIYAHARA Nobuyuki (NIRS)

E-mail: hiroshi-ueda@waseda.jp

1. はじめに

近年、高温超電導線材の高性能化が進み、SMESやSi単結晶引き上げ装置に応用されるようになってきている。

将来は、核融合や加速器への応用も期待される。このような応用の場合、放射線環境中での利用がありうる。放射線環境中で用いる機器の放射化はメンテナンス時の装置運用や被ばく管理上好ましくない。さらに機器廃棄時にも高レベル廃棄物となる可能性を考慮する必要がある。そこで今回、高温超電導線材の放射化分析を行い、照射線量と放射化のレベルを評価したので報告する。

2. 実験方法

放医研低線量タンデム加速器からの2 MeV中性子を室温中でYBCO線材およびBi2223線材に照射し生成するRIの測定を行った。Bi2223およびYBCOサンプルの幅はともに4.4 mm、厚さはともに0.22 mm、長さはそれぞれ180 mm、190 mmである。サンプルの重量はそれぞれ1.4325 g、1.5441 gである。Beターゲット上のdeuteron(重水素)電流は400 μ Aでターゲットからの距離117 cmで照射野直径30 cm、照射線量率は2 Gy/hで、照射を30分(1 Gy)行った。その後、GM計数管(試料表面からの距離4 cm)およびNaIシンチレーター(直接接触)を用いて減衰測定を行った。試料の放射能が持ち出し基準以下(GM計数管で130 CPM以下)になったことを確認後、Ge検出器により超電導線材中に生成したRIをガンマ線スペクトルより推定した。

3. 実験結果

3.1 試料放射能減衰曲線の測定

Fig. 1にGM計数管による照射終了後5分からの試料放射能の減衰測定を示す。照射直後にはBi線材の放射能はYBCOの約2倍であるが18分後には両者の関係は逆転した。Biは約60分後には環境レベルの2倍程度にまで減衰し放射線管理区域外に持ち出し可能となった。一方、YBCOは曲線の傾きが緩やかになり減衰していることから長寿命各種の存在が示唆される。照射5分後の測定よりBiの第一半減期は約6分(照射後11分)、第二半減期は約10分(照射後15分)、第三半減期は約12分(照射後17分)であり、ほとんどが短寿命各種であると考えられる。YBCOの第一半減期は約5分(照射後10分)、第二半減期は約11分(照射後16分)、第三半減期は約19分(照射後24分)であり、半減期が徐々に長くなっていることから長寿命各種の存在が示唆される。照射直後のGM測定値はBiとYBCOでそれぞれ53 kCPMと26 kCPMであった。

Fig. 2にNaIシンチレーターによる試料放射能の減衰曲線を示す。照射線量が1 Gyと低いため参考程度にしかならないが照射終了直後の試料表面での線量率はBiとYBCOでそれぞれ0.78と1.5 μ SV/hであり、共に短時間で減衰しBiは20分、YBCOは約30分後には環境レベルと同等になった。

3.2 ガンマ線スペクトル測定

Table 1にBi線材内に生成したガンマ線放射性核種およびその由来元素をGeスペクトルから推定した結果を示す。Biは元来放射性核種であり短寿命であることが予想されることから

Ge測定を行った3日後には減衰して消滅したものと考えられる。110Agは安定化銀が放射化し、生成されたものと考えられる。

Table 2にYBCO線材内に生成したガンマ線放射性核種およびその由来元素をGeスペクトルから推定した結果を示す。基板のNiから57Coが、安定化層の銀から110Agと187Wが生成している。カタログでは銅が安定化に用いられているので銅由来の核種を期待していたが確認できなかった。

両線材共に半減期として最も長いものでも110Agの250日であり、廃棄のために特別に長期間保管しなければならない(核燃料のように)ものではない。

4. 今後の予定

今後は、10 MeV中性子による照射実験を行い、中性子エネルギーの相違による生成核種の相違が認められるか確認する。さらに、大線量照射による照射前後の超電導特性を測定し中性子照射による超電導特性に変化があるか調査する予定である。

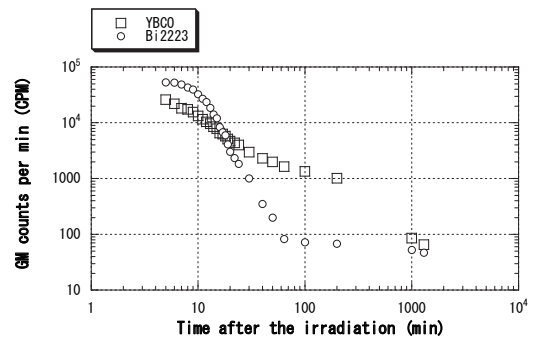


Fig. 1. Radioactive decay curves by using GM detector.

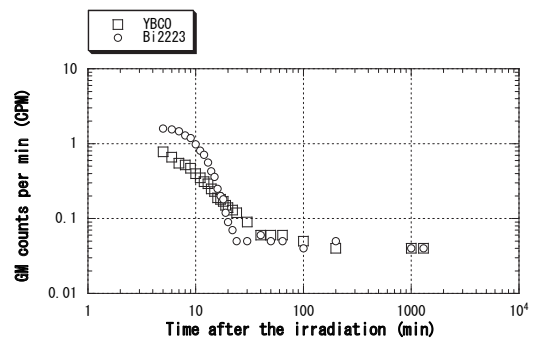


Fig. 2. Radioactive decay curves by using NaI scintillator.

Table 1 Induced RI, half-life and Radioactivity for Bi2223 tape

Induced RI	Half-life	Radioactivity at measurement (Bq)	Radioactivity after irradiation (Bq)	Source of RI
110Ag	250.4 days	4.63	4.66	Ag

Table 2 Induced RI, half-life and Radioactivity for YBCO tape

Induced RI	Half-life	Radioactivity at measurement (Bq)	Radioactivity after irradiation (Bq)	Source of RI
110Ag	250.4 days	0.320	0.324	Ag
57Co	70.92 days	2.210	2.299	Ni, Mn, Fe, Co
187W	23.7 hours	25.85	428.39	W, Re

6.6kV 三相超電導限流器の開発 (1)全体システム

Design and Experimental Results of three-Phase Superconducting Fault Current Limiter (1)
Overview of the system

矢澤 孝, 高橋 政彦, 小柳 圭, 小野 通隆, 鳥羽 廣次, 瀧上 浩幸, 浦田 昌身 (東芝), 齋藤 隆 (フジクラ),
雨宮 尚之 (横浜国大), 塩原 融 (ISTEC-SRL), 石橋 悠, 伊藤 俊之 (東京ガス)

YAZAWA Takashi, TAKAHASHI Masahiko, KOYANAGI Kei, ONO Michitaka, TOBA Koji, TAKIGAMI Hiroyuki, URATA Masami
(Toshiba Corporation); SAITO Takashi (Fujikura Ltd.); AMEMIYA Naoyuki (Yokohama National Univ.); SHIOHARA Yuh
(ISTEC-SRL); ISHIBASHI Yu, ITO Toshiyuki (Tokyo Gas Co., Ltd.)

E-mail: Takashi.yazawa@toshiba.co.jp

1. はじめに

H18~H19 年度に経産省プロジェクト「超電導応用基盤技術研究開発」の中で超電導限流器要素技術開発を実施した。本要素開発はプロジェクトで開発された次世代線材の限流器への適用性検証が目的である。H18 年度は、高抵抗化を図った次世代線材を巻線した試作コイルを用いて、6.6kV の短絡試験を実施し、十分な限流特性が得られることを確認した [1,2]。H19 年度は、開発した線材を並列に巻線して容量増加を図った。その後、コイルを三相分製作し、冷却容器、周辺機器と組み合わせて、6.6kV 三相限流器としてまとめ上げシステム検証を実施した。ここではその概要について報告する。

2. 6.6kV 超電導限流器のシステム概要

本開発では、IBAD/PLD 法により製作されたハステロイ® (Haynes International, Inc. の登録商標) 基板 YBCO 線材および GdBCO 線材を使用した。高抵抗化を図るため、安定化金属層として NiCr を使用した。この線材を 2 並列化し無誘導に巻線した、定格 72Arms のコイルを 3 相分製作した(連番(2)で報告)。これらのコイルを一つのサブクール室素冷却容器に組み込み、運転温度は 70K とした。吊具に固定した三相コイルの写真と、冷却容器と冷凍機用圧縮機の写真を図.1 に示す。その後、これらを周辺機器と組み合わせて、6.6kV の限流器システムとした。周辺機器は、遮断器、電圧・電流の計測系 (VT, CT)、シーケンス系である。必要な構成要素は、盤の中に収納した。開発した限流器盤の写真を図.2 に示す。盤は、右から、超電導機器が入るクライオ盤、遮断器盤、および受電盤に分かれる。

3. 評価試験

6.6kV 三相限流器において、実施した主な試験の一覧を Table1 に示す (詳しくは、連番(3)で報告)。

コイルを容器に組み込む前に、それぞれの通電性能を、直流通電、交流電通、にて確認した。コイル容器に収納した時点と盤として構成した時点で、6.6kV 機器の耐電圧仕様である交流 22kVrms × 1 分間を対地間、相間ともに確認した。

次に、東芝/大電力・高電圧試験所にて短絡試験を実施した。事故モードとして、三相地絡、二相短絡を実施し、6.6kV 印加に対する良好な限流効果と、所定のシーケンス動作が機能することを確認した。

最後に 6.6kV 三相限流器システムを、東京ガス/千住テクノステーションに設置し、ガスエンジンと電力系統との接続状態で連続運転する連系実証試験を成功させた。

4. まとめ

高抵抗化を図ったIBAD/PLDハステロイ®基板YBCO線材およびGdBCO線材を用い、限流器用コイルを開発し、最終的に6.6kV三相限流器を構築して、限流試験、系統試験などの検証試験を実施した。本研究開発により、次世代線材の限流器への適用性を検証し、さらに超電導限流器の実用化へ向けて大きな知見を得ることができた。

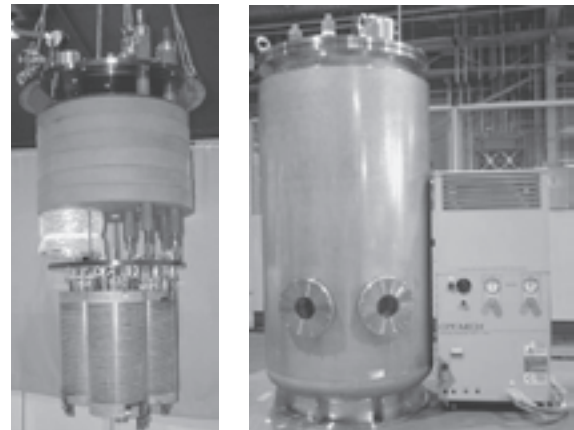


Fig.1 Three-phase set of coils would by 2G tapes (left), sub-cooled nitrogen cryostat and compressor (right)



Fig.2 FCL panel board in which the cryostat, the compressor, and the circuit breakers are mainly installed

Table 1 Summary of the experiments

試験項目	結果
各相のコイル通電性能	・定格72Armsで線材間の電流分配±2% ・交流損失 約3.5W/相
耐電圧性能	・RST-対地間 22kVrms×1分 ・相間 22kVrms×1分
限流試験	・3相地絡 6.6kVrms限流 ・2相短絡 6.6kVrms限流
系統試験	・自立運転 6.6kVrms/66Arms ・連系運転 6.6kVrms/72Arms

謝辞

本プロジェクトは、経済産業省プロジェクト「超電導応用基盤技術研究開発」の一環として、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から委託を受けて実施したものである。

参考文献

1. Yazawa, et al.: Abst. of CSJ Conf., Vol. 76 (2007) p.112
2. Koyanagi, et al.: Abst. of CSJ Conf., Vol. 76 (2007) p.113

6.6kV 三相超電導限流器の開発 (2) RE 系線材を用いた超電導コイル Design and Experimental Results of Three-Phase Superconducting Fault Current Limiter (2) Superconducting Coils Wound with REBa₂Cu₃O_y Coated Conductor

小柳 圭, 矢澤 孝, 高橋 政彦, 小野 通隆, 酒井 正弘, 瀧上 浩幸, 浦田 昌身(東芝);
飯島 康裕, 齋藤 隆(フジクラ); 雨宮 尚之(横浜国大); 塩原 融(ISTEC-SRL)

KOYANAGI Kei, YAZAWA Takashi, TAKAHASHI Masahiko, ONO Michitaka, SAKAI Masahiro, TAKIGAMI Hiroyuki,
URATA Masami (Toshiba Corporation); IJIMA Yasuhiro, SAITO Takashi (Fujikura Ltd.);
AMEMIYA Naoyuki (Yokohama National Univ.); SHIOHARA Yuh (ISTEC-SRL)

E-Mail : kei.koyanagi@toshiba.co.jp

1. はじめに

経産省プロジェクト「超電導応用基盤技術研究開発」の限流器要素技術開発において、高抵抗金属をラミネートした RE 系高温超電導線材を開発し、限流特性を評価してきた[1,2]。この線材を使って 6.6kV 超電導限流器用三相コイルを試作した。本報告では、線材と限流器用コイルの通電特性の評価結果について述べる。

2. 線材とコイルの諸元

コイルには IBAD-PLD プロセスで作製した YBCO 線材および GdBCO 線材を使用した。5mm 幅の線材の Ag 蒸着保護層の上に、厚さ 0.04mm の Ni-Cr 合金 (NCH1、Ni77%,Cr20%) のテープを接合し、ポリイミドフィルムで絶縁処理した。通電容量増加のため、線材を2並列構成として FRP 製の巻枠に巻線した。コイルの外観を Fig.1 に示す。必要な線材長を得るために、4層のコイルを無誘導同軸に配置して、2並列4直列の回路で単相コイルを製作した。本コイルの諸元を、Table1 に示す。

3. 試験結果

4層構造の単相コイルを冷凍機冷却した 70K の液体窒素に浸漬し、通電試験を実施した。まず並列構成の各線材の超電導特性を確認するため、並列の2経路それぞれに直流電流を通電し、線材約 30m 長の両端で使用線材の単体性能から予想した通電特性であることを確認した。続いて、2並列線材間の電流分配を確認するため、コイルに交流通電試験を実施した。Fig.2 に、コイルの通電容量 200A(70K) に対し、74A_{rms} (105A_{peak}) を通電した結果を示す。本結果から並列回路間の電流値のばらつきは 2% 以下であり、設計時の目標とした 5% 以下のばらつきが得られることを確認した。また、交流通電時の損失を電流・電圧積分により評価し設計通りの温度 70K で 3.5W/相が得られ、冷凍機の冷凍能力に比べて十分小さいことを確認した。

4. まとめ

高抵抗金属をラミネートした RE 系線材を使って限流器用コイルを開発し、特性評価をした。次世代線材の 6.6kV 超電導限流器システムへの適用性を確認することができた。

参考文献

- [1] T. Yazawa, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.112
[2] K. Koyanagi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.113

Table1. Specifications of the FCL coil (single-phase).

Conductor	REBCO Coated conductor, IBAD-PLD method
Size	5.0mm ^w × 0.2mm ^t
Total length	240 m
No. of layers	4
Coil diameter	φ 150 mm ~ φ 240 mm
No. of turns	203
Parallel tapes	2
Coil height	500mm
Resistance	17 ohm at 300K
Inductance	1.3 × 10 ⁻⁴ H



Fig. 1 Photo of the coil wound with REBCO tapes.

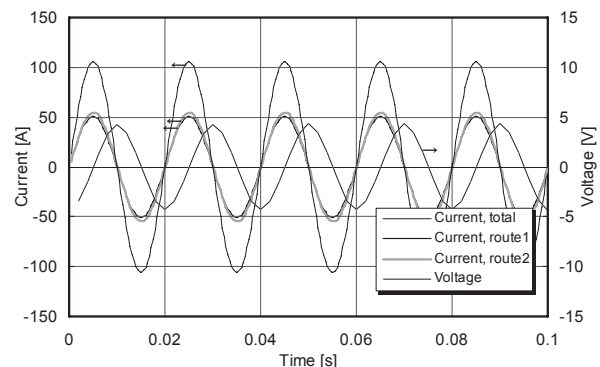


Fig. 2 Voltage and current waves in the parallel tapes of the coil in AC operation.

謝辞

本プロジェクトは、経済産業省プロジェクト「超電導応用基盤技術研究開発」の一環として、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から委託を受けて実施したものである。

ITER 計画の進展 Progress in ITER Project

高橋 良和、中嶋 秀夫、磯野 高明、小泉 徳潔、濱田 一弥、布谷 嘉彦、松井 邦浩、
名原 啓博、押切 雅幸、辺見 努、河野 勝己、奥野 清 (原子力機構)
TAKAHASHI Yoshikazu, NAKAJIMA Hideo, ISONO Takaaki, KOIZUMI Norikiyo, HAMADA Kazuya,
NUNOYA Yoshihiko, MATSUI Kunihiro, NABARA Yoshihiro, HEMMI Tsutomu,
OSHIKIRI Masayuki, KAWANO Katsumi, OKUNO Kiyoshi (JAEA)
E-mail: takahashi.yoshikazu@jaea.go.jp

1. はじめに

ITER 計画では、2005 年に建設サイトを南フランスのカダラッシュに決定し、2006 年 11 月に ITER 協定が 7 極により正式に調印した。その後、それぞれの極内において協定の批准を行い、2007 年 10 月 24 日に正式に ITER 協定が発効するとともに、ITER 機構が正式に発足した。また、時を同じくして、日本国内の実施機関として、日本原子力研究開発機構が政府より指名された。さらに、本年 1 月には、ITER 建設の許認可申請の主要文書が、ITER 機構からフランス原子力当局へ提出され、着々と建設許可へ向け進められている。また、超伝導マグネットの各コンポーネントの調達作業に下記のような進展があった。

2. トロイダル磁場 (TF) コイル用導体

2007 年 11 月 28 日には、Fig.1 に示すように、ITER 機構が正式に発足して最初の調達取決めとなる ITER 機構と日本国内の実施機関である日本原子力研究開発機構との間で「TF コイル用超伝導導体の調達取決め」が締結されました。これにより、今年の 3 月に各メーカーとの契約を結び、日本における導体の製作を開始しました。また、日本に続いて、欧州とロシアがすでに調印した。

TF コイル用導体は直径 0.82mm の Cr メッキ付き Nb₃Sn 素線を 900 本と銅線 522 本を撚線し、ステンレス (316LN)製の円型ジャケットの中に挿入し、所定の外径まで圧縮成型したものである。試作した導体の短尺試験が行われた。詳細は本講演会 1B-a08 において報告される。

3. トロイダル磁場 (TF) コイルの製作技術の開発

TFコイルは高さ14m、幅9mで、これまでにない大きさのD型超伝導コイルである。欧州においてTFモデル・コ

イルが製作されたが、大きさは約1/3であるので、スケールアップによる製作技術における課題が生じた。巻線部の製作技術を確立するため、高精度巻線および電気絶縁材の含浸などの技術開発を行った。これらの詳細は、本講演会 1B-a09において報告される。また、コイル容器の製作技術を確立するため、13トンのステンレス(316LN)インゴットおよび部分モデルの製作が行われた。部分モデルにおいては、原子力機構と鉄鋼メーカーで共同開発された高強度ステンレスJJ1の鍛造品を用いて、長さ1mの実機サイズの容器の部品を製作し、機械加工の基礎データを取得した。

以上より、製作技術の確立に対し、大きく前進した。また、「TFコイルの調達取決め」は現在協議中で、今年の6月には締結される予定である。

4. ポロイダル磁場 (PF) コイルの実証試験

PFコイル用導体(角型ステンレス製ジャケット、CIC型 NbTi導体)の性能を確認するため、欧州が試験コイル(PFインサート・コイルと呼ばれる)を製作し、PFインサート・コイルは、今年の1月に、那珂研のCSモデル・コイル試験装置の中に据付けられた(Fig. 2)。PFインサート・コイルは外径が1.6m、重量が約6トンで、PFコイルの運転条件(最高磁場：7T、最大運転電流値：52kA)を模擬した試験が6月から行われる予定である。本試験は、PFコイル用導体の技術仕様を確立し、調達を開始するために重要なものである。日本はPFコイルの調達を分担しないが、本試験により貢献するものである。詳細は本講演会 1B-a10 において報告される。

以上より、超伝導マグネットの各コンポーネントの調達作業が、ITER建設に向けて、本格的に開始した。



Fig. 1 ITER Director General Kaname Ikeda and Dr. Toshi Nagaoka, Director of International Affairs at the Japan Atomic Energy Agency (JAEA) signed the first Procurement Arrangement for the superconductors of the Toroidal Field (TF) Coils of the ITER machine.

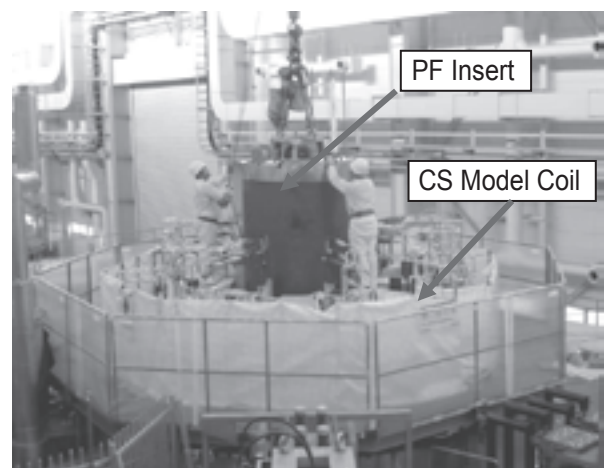


Fig.2 PF Insert installed in CS Model Coil Test Facility

ITER TF コイル調達合意文書の外部評価ならびに ITER 設計評価検討 WG の状況報告

Report on reviewing of ITER TF coil PA and activities of ITER design evaluation WG

西村 新 (核融合研)
NISHIMURA Arata (NIFS)
E-mail: nishi-a@nifs.ac.jp

1. はじめに

国際熱核融合炉 (ITER) は、300-500 秒に及ぶ定常的な重水素-三重水素反応を目指して国際協力の元に設計、建設が進められている非常に大きなプラズマ実験装置である。この装置では、大変広い空間に高密度、高温のプラズマを閉じ込めるため、巨大なトロイダル磁場 (TF) コイル、ポロイダル磁場 (PF) コイル、中心ソレノイド (CS) コイルが配置され、それらはすべて超伝導磁石である。このような巨大な超伝導磁石はこれまで製作された経験がなく、そのために多くの研究開発が進められてきた。

ITER の設計建設にあたっては、加熱機器や計測機器、プラズマ真空容器などのように機器ごとに担当が分かれ、超伝導磁石部門はその中の重要な位置を占めている。講演者は TF コイルの調達合意文書作成の外部評価委員を ITER 機構から直接委嘱され、2007 年 10 月からその評価にあたってきた。また、2008 年 1 月からは核融合エネルギーフォーラム ITER・BA 技術推進委員会から委嘱を受け、ITER 設計評価検討 WG のメンバーとして ITER 設計評価活動を行ってきている。

本報告では、これらの評価活動の位置づけ、活動内容について報告する。

2. ITER TF コイル調達合意文書の外部評価活動

ITER 計画では、機器の調達は基本的に各極 (Domestic Agency. DA) が行うが、それらの調達は国際機構 (International Organization. IO) と DA との間の合意文書を基に実施される。この合意文書 (Procurement Agreement. PA) は IO と DA が協議して作成するが、外部評価委員が参加して、その文書の合理性、妥当性を評価することとなっている。評価の視点は幾つかあるが、当初の性能を発揮すること、予算を効率的に執行すること、スケジュールが妥当であること、などが主要なポイントとなる。TF コイル導体の場合には、2007 年 11 月 28 日に IO と JADA との間で PA に調印された。

外部評価委員は以下のメンバーである。

Calro Sborchia (ITER IO, Chairman) 2008 年 1 月から Neil Mitchell (ITER IO, Chairman)、Lucio Rossi (CERN, Co-chairman)、Juan Knaster (ITER IO)、Arata Nishimura (NIFS)、Roberto Penco (retired, formerly ASG Superconductors)、Richard J. Thome (General Atomic)、Gernot R. Zahn (retired, formerly FZK)、Keeman Kim (NFRI)。

これまで 3 回の会議がもたれた。開催期間と開催場所は以下の通りである。

2007 年 10 月 9 日-11 日。エキサンプロヴァンス。

2007 年 12 月 11 日-13 日。ジュネーブ。

2008 年 2 月 12 日-13 日。エキサンプロヴァンス。

検討してきた内容は大雑把に以下の通りである。

1. 巻線方法。巻線機製作。
2. ラジアルプレートの製作。
3. 導体熱処理と絶縁処理。
4. ダブルパンケーキの絶縁。
5. 7 つのダブルパンケーキの一体化 (ワインディングバック製作)。
6. コイル容器への WP の挿入。
7. コイル容器の溶接。
8. コイル容器の対地絶縁。
9. 計測機器の取り付けと配線。必要な TF コイル導体、コイル容器および計測センサーは IO から支給されることになっており、それらを前提とした PA Draft が検

討されてきた。適用規格や評価方法、評価基準など TF コイルを製造するための様々な議論が継続してなされてきている。

会議のたびに Revision 版が作成され、2 月時点ではかなりまとまった PA となった。設計や予算は 2001 年の Final Design Report. (FDA) を基に行われているため、FDR からの設計変更、追加に関しては予算の追加処置とスケジュールの変更が必要となる場合があり、各 DA は慎重にならざるを得ない。2 月の時点で PA の Draft を取りまとめたが、それ以降、IO と DA との間で議論が続き、4 月にも会議が持たれている。

3. ITER 設計評価検討 WG の活動状況

ITER の最高意思決定機関は ITER 理事会 (ITER Council. IC) であり、その理事会の下に ITER 機構長、Management Advisory Committee (MAC)、Science & Technology Advisory Committee (STAC) が設置されている。2006 年 11 月の 7 極による ITER 計画調印後、2001 年の FDR の見直し作業が開始され、2007 年 11 月の STAC で ITER 設計評価結果が承認され、その後に開かれた IC は、(1) ITER 設計評価が成功裏に完了したことを確認し、(2) STAC と MAC が行ったレビューに従って機構長に事業明細を提出するよう求めた。これまで設計の中心文書であった 2001 年 FDR を見直し、「2007 年ベースライン文書」を作成することが目的である。

STAC は ITER 設計評価過程でまとめられた指摘事項の検討を各極に要請した。日本では、文部科学省からの依頼を受け、核融合エネルギーフォーラムの ITER・BA 技術検討委員会の中に ITER 設計評価検討 WG が組織された。主査は大阪大学の堀池寛教授で、委員には小川雄一 (東大)、笹尾真実子 (東北大)、吉井良介 (日本 NUS)、金子 修 (NIFS)、西村新 (NIFS)、林巧 (JAEA) の各氏が選任された。

検討項目は以下の通りである。(1) プラズマの上下方向安定性、(2) プラズマ形状制御と PF コイル、(3) オーミック加熱制御の Flux Swing と CS コイル、(4) ELM 制御、(5) 遠隔制御、(6) 真空容器の耐荷重設計と内部機器、(7) ダイバータ材料、(8) 17MA 放電、(9) コイルのコールドテスト、(10) プラズマ加熱とプラズマ電流制御、(11) Test Blanket Module 計画、(12) ホットセルの設計、(13) 各極の科学技術コミュニティーと IO との連携維持と強化。

低温、超伝導に関わる検討事項は (9) のコイルのコールドテストである。また、(2) と (3) の PF コイルや CS コイルの設計も一部関係する。ITER 計画では超伝導コイルは計画自体を支える重要な機器である。これまで建設されたことのない巨大な超伝導コイルであるが、所定の性能を運転当初から発揮するよう計画が進められなければならない。一方、予算とスケジュールは極めてタイトであり、様々な要因を考慮しながら最善の方策を策定することが必要である。

4. おわりに

ITER の設計評価が進められ、2001 年 FDR に代わる 2007 年ベースライン文書が策定されようとしている。一方、ITER 計画としてはじめて IO と DA が TF 導体の合意文書に署名し、TF コイルの PA の評価が行われ、大型超伝導コイルの建設に向けて着実に計画が押し進められている。

ITER-TF 導体の調達活動の進展と SULTAN 試験結果

Progress of procurement of ITER TF conductor and results of SULTAN test

磯野 高明, 松井 邦浩, 奥井 良夫, 妹尾 和威, 小泉 徳潔, 高橋 良和, 奥野 清 (原子力機構)

ISONO Takaaki, MATSUI Kunihiro, OKUI Yoshio, SEO Kazutaka,

KOIZUMI Norikiyo, TAKAHASHI Yoshikazu, OKUNO Kiyoshi (JAEA)

E-mail: isono.takaaki@jaea.go.jp

1. はじめに

原子力機構は、ITER 機構との取決めにに基づき ITER 超伝導コイルの最初の調達活動となる TF 導体 (Fig. 1) の調達を開始した。この調達の前に、国内 4 社が製造した Nb₃Sn を用いて実規模導体の超伝導特性をスイスのサルタン試験装置を用いて評価しており、内 2 社分については昨年報告した [1]。今回は、残り 2 社の素線を用いた導体性能試験結果と調達活動の進展について報告する。

2. ITER-TF 導体の調達活動の進展

ITER-TF 導体は、日本、欧州、韓国、ロシア、米国、中国が調達するが、日本は 25% (4.75 個分) を分担する。日本が調達する TF 導体用 Nb₃Sn 素線の重量は約 100ton であり、TF 導体の総長は約 22km である。原子力機構は、昨年 11 月に TF 導体調達の取決めに IO と結んだ。国内メーカーとの契約は、Nb₃Sn 素線の製作、撚線作業、導体化作業 (ジャケット製作を含む) の 3 段階に分割した。Nb₃Sn 素線については、2 社が各々 1 コイル分を 2 年間で製作する契約としている。

3. TF 導体仕様のオプション

今までの実施された導体性能評価試験において、撚りピッチの長い導体で高い性能が測定されていることから、現状 2 つのオプションが存在している。主な違いは、撚りピッチを長くしていることと、ポイド率を低くしていること (Table 1) である。日本は長いピッチの撚線の製作が困難であることを指摘している。日本、米国、韓国が製作したオプション 2 の導体について性能評価が行われたのち、最終的な仕様を決定する。

4. SULTAN 試験結果

導体性能を評価するサンプルは、長さ 3.6m の直状往復導体である。スイスにあるサルタン試験装置を用い、TF の運転条件である 68kA, 11.8T (ただし装置の発生する磁場は 10.78T) における分流開始温度 (T_{cs}) を測定して、導体性能を評価した。運転条件を模擬するためには、超伝導生成熱処理やサンプル製作中に歪みを逃がさないことが重要であり、このサンプル (JATF3) では箱形のジョイントを取り付けてから熱処理する方法を採用した [2]。これは参考文献 1 のサンプル (JATF1) と同じ構造である。JATF1 の導体の仕様はオプション 1 であるが、JATF3 の導体はツイストピッチとポイド率についてオプション 2 の仕様で製作した。

JATF3 サンプルの導体の T_{cs} 測定結果は素線特性から予想される値と比較し、かなり低い値となった。導体の T_{cs} 測定結果と素線の J_c-B-T_c 特性から求めた有効歪みと、電磁力 (BI) の関係を Fig. 2 に示す。前回のサンプル (JATF1) と比較して今回のサンプル (JATF3) は有効歪みの電磁力依存性が大きい。装置の制約から約 400kN/m 以下での T_{cs} 測定は行っていないが、測定結果の外挿から、電磁力が掛からない状態では有効歪みの差は余りないと考えている。

通常は導体間が広がる方向に電磁力を掛けて T_{cs} を測定するが、今回電磁力の方向 (通電方向) を逆にして測定したところ T_{cs} は向上し、有効歪みは JATF1 サンプルとほぼ同じ値 (-0.74%) となった。有効歪みは電磁力の方向に依存しない

結果となるはずであり、このことからオプション 2 の導体又はジョイント部に何らかの異常があると判断している。今後、サンプルを解体して原因を調査する予定である。

参考文献

1. Y. Takahashi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.219
2. K. Matsui, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.218

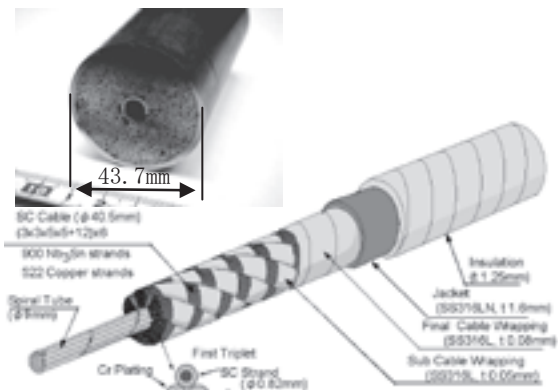


Fig. 1 ITER TF conductor

Table 1 Major difference between options of TF conductor

	Option 1	Option 2
Twist Pitch	45/85/125/ 250/450 mm	80/140/190/ 300/420 mm
Void fraction	33 %	29 %
Central channel	OD 9mm ID 7mm	OD 10mm ID 8mm

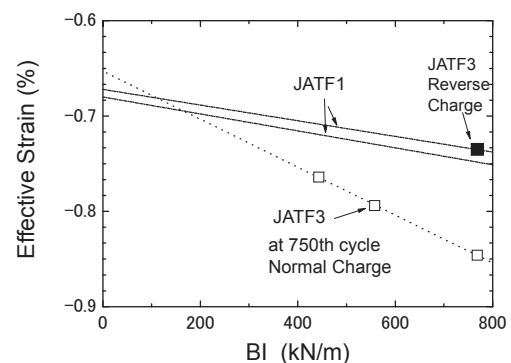


Fig. 2 Effective strain of one of JATF3 sample compared with JATF1 sample.

ITER-TF コイル製作技術に関する開発研究 R&D Study for ITER-TF Coils Fabrication Technique

辺見 努, 小泉 徳潔, 松井 邦浩, 濱田 一弥, 高橋 良和, 中嶋 秀夫, 奥野 清(原子力機構);
久野 和雄, 野元 一宏(三菱電機); 酒井 正弘, 浅野 史朗(東芝)

HEMMI Tsutomu, KOIZUMI Norikiyo, MATSUI Kunihiko, HAMADA Kazuya, TAKAHASHI Yoshikazu, NAKAJIMA Hideo,
OKUNO Kiyoshi (JAEA); KUNO Kazuo, NOMOTO Kazuhiro (Mitsubishi Electric); SAKAI Masahiro, ASANO Shiro (Toshiba)
E-mail: hemmi.tsutomu@jaea.go.jp

1. はじめに

原子力機構では、今年度から ITER-トロイダル磁場(TF)コイルの調達活動を開始する。Fig.1 及び Table 1 に示す ITER-TF コイルは、ITER-EDA の一環として開発された TF モデルコイル(TFMC)の約3倍の大きさである。TFMC の開発において、基礎的な製作技術は実証されたが、スケール・アップによる新たな技術課題も生じている。これらを解決するために、高精度D型自動巻線試作、絶縁材含浸試験、カバー・プレート(CP)溶接変形試験等を実施している。本発表では、これらの試作及び実証試験の結果について報告する。

2. 高精度 D 型自動巻線試作

TF コイルでは、絶縁を施した導体をラジアル・プレート(RP)に挿入する構造を採用するため、巻線精度として 0.035%が要求されている。これまでに、3点ロール曲げ自動連続巻線機を開発し、曲率一定及び曲率が連続的に変化する場合の成形を行った。今回は、これに導体送り量を0.01%以下の誤差で測定できる装置を開発し、より高精度な巻線を実現するとともに、Fig.2 に示すように実機の 1/3 サイズの D 型自動巻線を実施した。その結果、長さ12mのステンレス管を用いた巻線では目標の D 型形状に対して最大 1.7mm の誤差で成形でき、模擬導体についても矯正可能な範囲で成形することができた。また、巻線誤差や熱処理による変形に対する補正手法として、温度による寸法変化、3点曲げ治具による曲率矯正について検証試験を行い、十分に補正可能であることを実証した。

3. 絶縁材含浸試験

TF コイルでは、20年間の運転を実現するため 10^{22}n/m^2 の中性子照射量に耐える絶縁材が要求されている。これまでに実施した中性子照射後の層間せん断強度試験の結果から、エポキシ樹脂では要求される強度を満足することが困難であることがわかっている。そのため、耐放射線が高いシアネート・エステル(CE)樹脂の適用を検討し、検証試験として、TF コイルの絶縁構成を模擬した長さ 600mm のモデルを用いた含浸試験を実施した。その結果、Fig.3 に示す気泡の残留状況から、良好な含浸性を有すること、TF コイルに適用するために必要となる含浸時間(50 時間)に対して、十分に長い 200 時間以上のポットライフを有することを見出した。

4. カバー・プレート溶接変形試験

TF コイルでは、RP 溝に収めた導体に CP をかぶせ、RP と溶接する。導体長手方向に沿って約 700m の連続溶接が要求されており、溶接による変形が懸念される。そこで、長さ約 1m の RP 部分モデルを用いた溶接試験を行い、溶接後の平面度は 0.8mm となる結果を得た。また、長さ 284mm の平板の突合せ溶接の結果から求めた固有歪による歪による実機の変形予測では、要求される平面度 2mm に対して、1.4mm と評価された。今後、より精度を高めるため、RP 部分モデルの試験結果から固有歪を求め、実機の変形予測を行う予定である。

5. まとめ

ITER-TF コイルの調達活動の開始に向けて、TF コイルの製作技術に関する試作試験を実施し、TF コイル製作技術の確立に目途を得た。今年度より、実機 TF コイル製作を実施するため、製作装置の設計、検証及び模擬 DP 製作を開始する予定である。

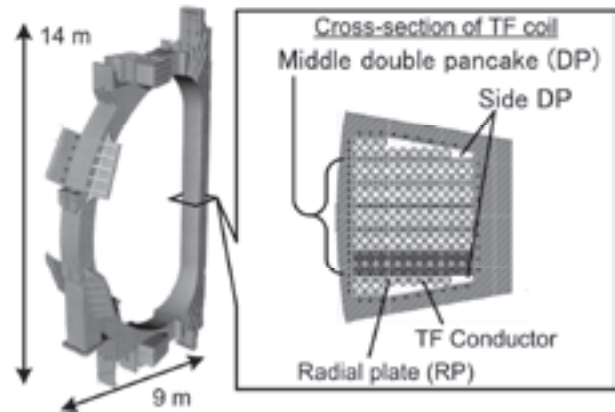


Fig. 1 ITER-TF coil.

Table 1 Major parameters of ITER-TF coil

Number of coils	18
Number of DP per coil	5 Middle DP + 2 Side DP
Conductor length	760 m / Middle DP 415 m / Side DP
Nominal current	68 kA
Nominal field	11.8 T
Weight	400 ton

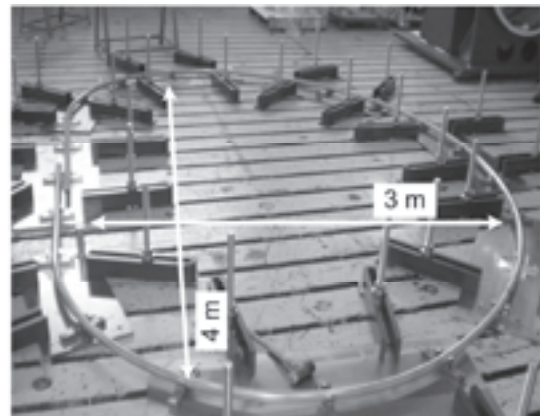


Fig. 2 Results of a D-shaped automatic winding.

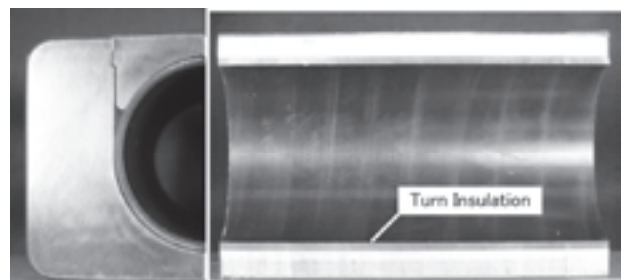


Fig. 3 Results of Impregnation test with Cyanate Ester resin.

ITER-PF インサート・コイル試験

Experiment of the ITERPF Insert Coil

布谷 嘉彦, 高橋 良和, 磯野 高明, 押切 雅幸, 河野 克己, 小泉 徳潔,
濱田 一弥, 松井 邦浩, 名原 啓博, 辺見 努, 奥野 清 (原子力機構)

NUNOYA Yoshihiko, TAKAHASHI Yoshikazu, ISONO Takaaki,

OHIKIRI Masayuki, KAWANO Katsumi, KOIZUMI Norikiyo, HAMADA Kazuya,

MATSUI Kunihiro, NABARA Yoshihiro, HEMMI Tsutomu, OKUNO Kiyoshi (JAEA)

e-mail: nunoya.yoshihiko@jaea.go.jp

1. 概要

国際プロジェクトとして国際熱核融合実験炉 (ITER) の開発が進められている。ITER 建設にあたり、超伝導磁石に使用する超伝導導体の性能を試験し、性能試験結果に基づき超伝導磁石の技術仕様の確定をして各極での調達を開始する。ITER ポロイダル磁場 (PF) コイル用超伝導導体は NbTi 超伝導線を用いた CIC 導体であり、その調達は、欧州、ロシアおよび中国が担当する。原子力機構には、実規模超伝導導体の性能試験を行うことができる ITER 共通試験装置がある。そこで、ITER 機構及び欧州からの委託を受けて、欧州が製作した超伝導導体試験コイル (PF インサート・コイル) を ITER 共通試験装置を使用して ITER-PF コイル用超伝導導体の性能試験を行う。

2. PF インサート・コイル

PF インサート・コイルは欧州で製作された試験コイルであり、ロシアにより製作された超伝導導体を用いている (Fig.1)。導体とコイルの緒元および導体の構成図を Table 1 と Fig.2 にそれぞれ示す。導体をソレノイド単層巻きし、上下にステンレスの支持構造物を設け、全体を絶縁材と共にエポキシ樹脂で含浸した構造を持つ。ITER 共通試験装置は、最大 13T の磁場を発生できる直径約 3.6m 高さ約 1.8m の超伝導マグネット (CS モデル・コイル)、超伝導導体試験コイルと CS モデル・コイルに最大 50kA の電流を供給できる高出力の電源、5kW の冷凍能力を持つ大型ヘリウム冷凍システム、およびデータ収集システムから構成される¹⁾。CS モデル・コイルの中心ポアに PF インサート・コイルを据え置き、性能試験を行う。

3. 性能試験

原子力機構での受入試験の後、PF インサート・コイルの ITER 共通試験装置への据え付け作業を 3月に終了した。その後室温で CS モデル・コイルを含めた全系のヘリウムリーク試験を行い、 $3 \times 10^{-8} \text{ Pa m}^3/\text{s}$ 以下の感度でリークが無いことを確認した。今後計測配線の確認およびデータ収集システムの調整を行い、5月中旬から約1ヶ月を要する 4.5K までの冷却を開始し、6月より超伝導導体の性能試験を行う。

ITER-PF コイルの最大定格電流 45kA における導体の経験磁場は 6T であり、最大約 1T/s 変動磁場下で使用される。そこで、ITER-PF コイルの動作環境を模擬するために、定常磁場に加え CS モデル・コイルを JT-60 ポロイダル磁場コイル用電源を使用して励磁することにより、PF インサート・コイルに変動磁場を印加する試験も計画している。

主な試験項目は、(a) PF インサート・コイルの冷媒温度を変化させ、発生電圧の測定による分流開始温度 (Tcs) の測定、(b) 台形波または指数関数的減衰波形の変動磁場の印加による、PF インサート・コイルの発熱量を冷媒の温度変化より把握する交流損失測定、(c) 定常磁場下で 10,000 回以上の定格までの連続的三角波による励磁が超伝導特性に与える影響を調べるサイクリック試験である。

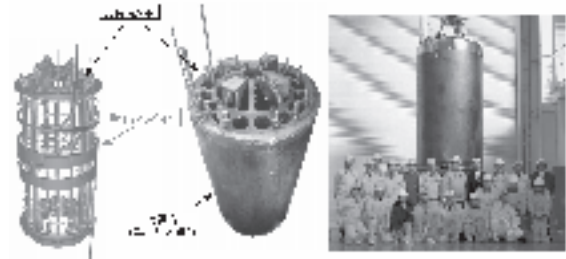


Fig. 1. The internal structure and overview of the PF Insert Coil.

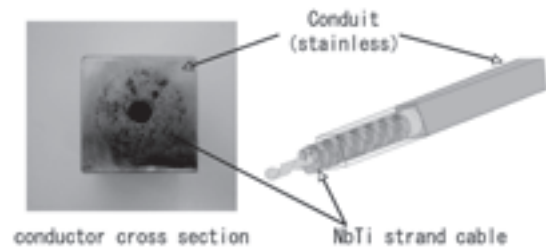


Fig. 2. Structure of the PF Insert Coil conductor.

Table 1. Conductor parameter of the PF Insert Coil.

NbTi strand	
outer diameter	0.73 mm
Cu/non-Cu	1.41
Ic @5T, 4.2K	488.6 A
RRR	199
Cable	
cabling pattern	3×4×4×5×6
No. of strand	1440
final twist pitch	486 mm
central spiral dia.	12 (outer), 10 (inner) mm
Conductor	
jacket material	stainlesssteel (Varinox)
outer dimension	50.3mm × 50.3 mm
inner diameter	38.3 mm
PF Insert Coil	
outer diameter	1.6 m
height	3.4 m (excl. a projection)
weight	6 ton
test field	6 T
operation current	45kA

別途欧州で行われた短尺の PF コイル用超伝導体の試験では、Tcs 測定時に高電流領域でクエンチするステックレーの制限電流的挙動、および素線間の接触抵抗の変化に起因すると思われるサイクリックによる交流損失の上昇が観測されており、PF インサート・コイルの性能との比較に興味を持たれる。

当日は PF インサート・コイルの通電試験の準備状況と通電試験の内容と意義の詳細を発表する。

参考文献

- 1) T.Kato, et al., Cryogenic Engineering (Japanese), vol.36-6, p.315-323(2001)

超伝導マグネット材料の中性子照射効果

Neutron Irradiation Effect on Superconducting Magnet Materials

西村 新 (核融合研); 竹内 孝夫 (物材機構); 西嶋 茂宏 (阪大); 四竈 樹男, 西島 元 (東北大);
落合 謙太郎, 小泉 徳潔 (原子力機構);

NISHIMURA Arata (NIFS); TAKEUCHI Takao (NIMS); NISHIJIMA Shigehiro (Osaka Univ.); SHIKAMA Tatsuo, NISHIJIMA Gen (Tohoku Univ.); OCHIAI Kentaro, KOIZUMI Norikiyo (JAEA)

E-mail: nishi-a@nifs.ac.jp

1. はじめに

D-D 反応や D-T 反応などの核融合反応を目指した核融合装置の設計、建設が進んでおり、中性子遮蔽ブランケットの設計ならびに真空容器のポート設計を通じて、核融合中中性子の透過、漏洩により、超伝導マグネットが中性子照射を受けることが明らかになってきている。超伝導マグネットに照射される中中性子のエネルギー分布 (中性子スペクトル) はマグネットの場所に依存して異なり、中性粒子打ち込み装置用のポート周辺で高いエネルギーを有する中中性子がマグネットに到達するものと評価されている。超伝導マグネットは、照射によって最も劣化した部分の特性によってマグネット全体の性能が支配されるため、局所的な照射損傷の評価が重要である。中性子損傷の基礎的な理解を深めるために、核融合中中性子源や原子炉を用いた照射研究環境の整備や研究体制の確立を目指した研究活動が進められてきている。

本講演では、超伝導マグネット材料の中性子照射に関わる研究体制の現状とその研究成果の一端を報告する。

2. 研究体制

中性子照射効果の研究体制を図 1 に示す。中性子照射場は日本原子力研究開発機構 (JAEA) の核融合中中性子源施設 (FNS) と研究用原子炉 (JRR-3) である。0.1MeV 以上の高速中性子照射量としては、FNS で 10^{21} n/m² 程度、JRR-3 で 10^{22} n/m² 程度であり、 10^{24} n/m² までの照射をベルギーの研究用原子炉 BR2 で実施する計画である。FNS の中性子源はまさに D-T 反応を起こさせるものであり、14MeV 単色の中性子線が得られる。一方、JRR-3 や BR2 は原子炉であり、3MeV 程度以下のエネルギー分布を持った中性子線が利用できる。これらの線源の違いによって、中性子線スペクトル効果が明らかになるものと期待される。照射後の超伝導特性評価が重要であるが、照射された試料はすでに放射化しており、放射性同位体 (RI) として管理区域内で取り扱われる必要がある。現在、臨界温度計測システムは小型 GM 冷凍機を用いたシステムをすでに構築しており (FNS)、高磁場中での臨界電流、臨界磁場測定はその手法の確立に向けて努力がなされている。(東北大学 金属材料研究所 強磁場超伝導材料研究センター) 照射試料は物質材料研究機構 (NIMS) や JAEA、関連する企業からの提供を受け、新しい材料の核融合応用の可能性を検討している。なお、中性子照射とともに核融合超伝

導マグネットは γ 線照射を受けるが、この γ 線照射に関しては大阪大学産業科学研究所の Co-60 を利用させていただいている。

3. 照射試料

現在取り上げている照射試料は超伝導線材 (テープ) としては Nb₃Sn、Nb₃Al、NbTi、Bi2223、YBCO であり、絶縁材料としてガラス繊維強化エポキシ樹脂、ガラス繊維強化シアネートエステル樹脂などである。超伝導線材の試料寸法は長さ約 35mm で、これは 4 端子法で直接臨界電流、臨界磁場、臨界温度を測定するためである。(残留放射能、放射化物を低減するためにできるだけ小さい試料を用いることが求められている。) GFRP の試料は 10mm 幅 x 15mm 長さ x 約 2mm 厚さであり、Short Beam 法による層間せん断強度を評価することが目的である。シアネートエステル樹脂は中性子照射によって強度低下が少ない材料とされており、その特性評価ならびにエポキシ樹脂のように劣化しない機構の解明が期待される。

4. 照射後試験

JAEA FNS での 14MeV 中性子照射試験では、試料を室温ならびに 4.5K に保持した状態で照射が可能であり、4.5K に保持した試料では、試料温度を徐々に 20K まで上昇、降下させることにより臨界温度測定が可能である。また、常温で照射した Bi2223 テープでは、液体窒素温度、自己磁場での臨界電流測定が可能である。しかし、NbTi、Nb₃Sn、Nb₃Al などは液体ヘリウム温度、強磁場中での実験が必要であり、現在の所、FNS の管理区域内でこのような実験を行うことはできない。そこで、搬送可能な程度に残留放射能が減衰している試料については、東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センターに搬送し、センターに設置されている 28T ハイブリッドマグネットを用いて超伝導特性変化を評価することとした。14MeV 中中性子を約 10^{21} n/m² 照射した試料の臨界電流と臨界磁場に関して世界初のデータが得られている。

JRR-3 では、照射温度は約 100°C 程度となり、室温状態に保持することは困難である。JRR-3 で照射した Nb₃Sn や Nb₃Al などの超伝導材は、FNS での場合と同じように東北大学金属材料研究所片平地区に搬送し、28T ハイブリッドマグネット、もしくは 15T 超伝導マグネットで照射後の超伝導特性を評価する予定である。現在の所、 10^{22} n/m² までの原子炉照射は終了しているが、残留放射能が高く減衰するのを待っている状況である。

層間せん断強度試験は、小型の機械試験装置により室温および液体窒素温度で実施可能である。 10^{21} n/m² 程度まで原子炉照射した試料および FNS で照射した試料の ILSS 試験を終了している。

5. おわりに

核融合炉用大型超伝導マグネットシステムで要求される中性子照射試験の現状を報告した。実際に得られているデータについては講演時に示し、幾つかの問題点を指摘する。系統的な研究の実施に向けて多くの人達による研究協力体制が構築されつつある。関係者に深く謝意を表する。

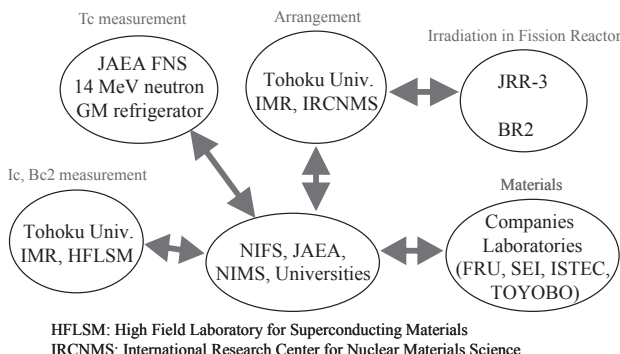


図1 中性子照射効果研究の実施体制

演繹法に基づく高温超電導誘導／同期機の全超電導化と臨界温度の異なる巻線を利用した運転制御法に関する基礎検討

Fundamental study on fully HTS induction/synchronous machine based upon the deductive logic and its operational control method by the use of different critical temperatures for stator and rotor windings

中村 武恒 (京大)

NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ.)

E-mail: tk_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに 京都大学のグループでは、高温超電導材料を2次側かご型巻線に適用した高温超電導誘導機に関する理論的かつ実験的検討を実施している^[1-7]。また、超電導臨界温度を超える運転温度においても通常の誘導機として動作する構造を考案し^[6]、超電導機器応用に際して大きな課題である冷却のストレスを克服するブレークスルーを実証した。上記グループでは、同回転機を高温超電導誘導／同期回転機 (High T_c Superconducting Induction/Synchronous Machine: HTS-ISM) と命名し、精力的検討を実施している。

本研究では、本質的に冷却条件下で運転する HTS-ISM を対象とし、演繹的条件における全超電導化、および臨界温度の異なる巻線を利用した運転制御法を検討したので報告する。

2. 超電導／常伝導ハイブリッド2重かご型回転子の検討^[6]

本研究では、超電導と常伝導の2重かご型巻線に適用したハイブリッド回転子を提案し、その基礎特性を検討している。Fig. 1には、ハイブリッド2重かご型回転子の外観写真を示す。また、Fig. 2には上記回転子を適用した無負荷回転特性の時間変化の測定例を示す。同図では、まず HTS-ISM を液体窒素浸漬状態で同期引き入れ後、クライオスタット内部の液体窒素を追い出しながら、昇温過程にて無負荷特性の時間変化を測定している。測定開始後 195 分程度で HTS-ISM の回転数 (N) に揺らぎが発生している。また、このとき高温超電導かご型巻線が所謂可逆領域 (損失状態) に移行したことに起因して、一次電流 (I_1) が急激に減衰している。さらに、205 分経過後に一次電流は 2.5 A 程度で安定しており、つまり HTS かご型巻線が完全に常伝導に移行し、HTS-ISM の特性が銅製かご巻線の誘導電流によって支配されるようになったと考えられる。ただし、すべり状態に移行後、さらに 80 分程度運転を継続したが、HTS-ISM は全く問題なく回転状態を維持することができた。即ち、このことは高温超電導回転機の実用運転に関して、臨界温度の壁を超えるブレークスルーになると期待される。

3. HTS-ISM の全超電導化^[7] これまで、高温超電導レーストラックコイルをベースとした等価分布巻固定子巻線を検討しており、HTS-ISM の全超電導化を実証すべく、現在試験の準備を進めている。

4. 臨界温度の異なる巻線を利用した運転制御法の検討

HTS-ISM の全超電導運転を指向する場合、上記検討から、高温超電導かご型2次巻線については、その臨界温度を超えても通常の誘導回転機として動作するが、固定子巻線については、強制通電することから臨界温度 (厳密には不可逆温度) 未満の温度に設定する必要がある。つまり、固定子および回転子巻線の臨界温度をそれぞれ T_{SC} , T_{RC} とし、運転温度 (T_{OP}) が T_{SC} 未満として演繹法で考えた場合、下記の運転制御法の実現が期待される。即ち、まず常に $T_{RC} < T_{SC}$ とする必要がある。この時、 T_{OP} が $T_{RC} < T_{OP} < T_{SC}$ ならば HTS-ISM は定常誘導モードで動作し、 $T_{OP} < T_{RC} < T_{SC}$ ならば定常同期モードで動作することになる。固定子巻線に要求される特性としては、十分大きな臨界電流値が挙げられ、Bi 系や Y 系線材



Fig. 1 Photograph of a squirrel-cage hybrid HTS rotor

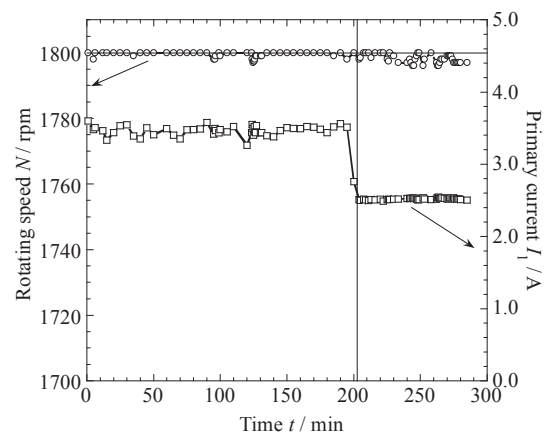


Fig. 2 Typical result of temporal variation of no-load characteristics by warming process of HTS-ISM

が期待される。一方、回転子巻線への要求事項は、上記臨界温度の関係とともに、大きな臨界電流値および高い n 値である。上記要求を満たす線材としては Y 系や MgB_2 が考えられる。従って、固定子巻線と回転子巻線に適用する線材の組み合わせとして、例えば Bi 系と Y 系や、あるいは Y 系と MgB_2 が考えられる。具体的運転シーケンスや制御法については、講演当日に報告する。

参考文献

- [1] G. Morita, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 19 (2006) pp. 473-478
- [2] T. Nakamura, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 16, No. 2 (2006) pp. 1469-1472
- [3] T. Nakamura, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 17, No. 2 (2007) pp. 1615-1618
- [4] T. Nakamura, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 20 (2007) pp. 911-918
- [5] K. Nagao, et al.: Supercond. Sci. Technol., Vol. 21 (2008) 015022(5pp)
- [6] T. Nishimura, et al.: The 2008 Annual Meeting Record IEE Japan, No. 5 (2008) p. 174
- [7] T. Nakamura, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p. 24

8000rpm を実証した二磁極軸回転体とツインバルクヘッド機構

8000rpm record by a rotor model with two gradient static magnetic field shafts and a twin bulk heads system

尾作 仁司(鉄道総研)

OZAKU Hitoshi (Railway technical research institute)

E-mail: mu@rtri.or.jp

1. はじめに

回転体の永久磁石磁場を「Mexican-Hat」型にする二磁極軸の磁場勾配を形成させ、さらに、回転体上下部に高温超電導バルク体を設置し、磁気シャフトにより固定する構造から、回転体を非接触状態で大気開放中において安定した高速回転が得られることを既に報告した[1]。今回8000rpmを連続して確認できたので報告する。

2. 実験方法

既報告[1]で使用したものと同一回転体およびツインバルクヘッド機構を使用した。回転体の発電部は4極から8極にし、回転体と同じアクリル材で構成した。全体の装置構成を図1に示す。測定はマルチデジタルメーターにより、周波数(Hz)、コイル電圧(V)、ツインバルクヘッド内温度(V)を10秒間隔で測定し、データとした。ちなみに、回転体本体は種類の径のアクリルパイプを組み合わせて、径70mm、高さ70mmである。浮上用磁石は、円柱Nd磁石(直径20mm、高さ10mm、0.45T)1個の回りに、リングNd磁石(外径50mm、内径30mm、高さ5mm、0.33T)2個を組み込んだものを1組として、回転体の上下にそれぞれ組み込んだ。回転体輪切り中央の位置に配置した発電部は、Nd磁石(20×10mm、厚さ2mm、0.23T)を3枚/組で8極構成するように組み込んである。モニター用コイルはI型からU型にし、半円状になるように充填材を詰めた。

ツインバルクヘッド機構は、回転体を上下から支持するヘッド内にそれぞれ、Dyバルク体(新日鉄製、直径46mm、厚さ10mm)を組み込んである。冷却セッティング温度は65Kとした。

回転させる窒素ガス圧は0.49MPa(5kg/cm²)、噴射時間は7分間とし、自然停止までを1回の試験とし、連続3回行った。

3. 結果

3回の周波数の測定結果を図2に示す。3回の周波数の最大値はそれぞれ、546Hz(8186rpm)、539Hz(8089rpm)、538Hz(8065rpm)であった。

目視による観測では、2000rpm前後で急激に回転体が激しくぶれだすが、そのまま窒素ガス圧を吹き続けると安定状態に移行した。その後は安定して回転が加速し、300秒前後で8000rpmに平衡になっていく曲線を描いた。ただし、安定した状態でも回転体の非精密形状による小さなブレは観察された。

4. 考察

目視による観察から、100Hz前後の回転体の大きなぶれは、装置の形状による影響と考えられ、流体力

学の基礎から単純に考えれば、回転体回りに乱流による境界層が形成され回転が安定すると考えられる。流れのイメージは、対向する噴出しの間に回転体があるので、境界層の剥離点は回転体の後方までであると考えられる。事実、窒素ガス圧が低い場合には回転体のぶれが納まらない現象が観察された。乱流発生要因は回転体の非精密さによる。回転が安定した後は加速が早まり、8000rpm前後から律速状態になっていったのは、回転体回りの空気力学的抵抗が影響しはじめたと考えられる。コイル等の形状を工夫すればさらに速度を向上させる可能性はある。ただし、大型化については、流れの相似則が成り立つとすれば、微小な回転ぶれの問題を解決する必要が生じる。

当然ながらN-S式を解くことはできないが、図2の1回目の測定曲線(y軸をrpmとする)の単純な近似式を参考までに示すならば、式(1)あるいは(2)になった。

$$y = 2E - 5x^6 - 0.0023x^5 + 0.1154x^4 - 2.3384x^3 + 1.6295x^2 + 667.38x + 99.059 \quad \dots(1)$$

$$y = (A * \exp(-\alpha/x) + B * \exp(-\beta/x)) / 2 \quad \dots(2)$$

$$A = 9000[\text{rpm}], B = 10000[\text{rpm}],$$

$$\alpha = 6[-], \beta = 4[-], x = t[\text{sec}]; t > 0$$

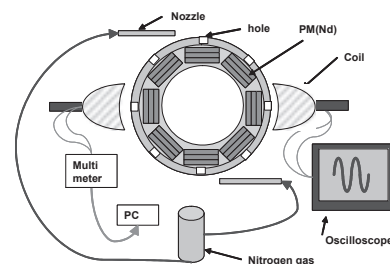


Fig.1 Rotor and measurement system

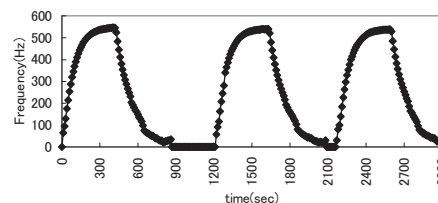


Fig.2 Result of frequency

参考文献

- H. Ozaku.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.28

超電導コイルと超電導バルク体を用いた磁気軸受の開発(3)

- 5kN 負荷での回転試験結果 -

Development of superconducting magnetic bearing using superconducting coil and bulk superconductor (3)

- Result of the rotation test with 5kN load -

清野 寛, 長嶋 賢 (鉄道総研)

SEINO Hiroshi, NAGASHIMA Ken (Railway Technical Research Institute)

E-mail: seino@rtri.or.jp

1. はじめに

高温超電導体バルク体 (HTS バルク) と超電導コイルを組み合わせた磁気軸受の研究・開発を行っている。超電導体同士を組み合わせることで、軸受の負荷容量を大きくすることが可能となる。適用先としては、フライホイールの回転体支持を想定しており、超電導磁気軸受の適用によって、軸受部分の保守に関する問題や、軸受部分の摩擦損失による運転効率の低下を改善することを目指している。

これまで、発生する電磁力の測定^[1]、電磁力の静的クリープと回転損失を把握するための基礎実験^[2]を行うとともに、荷重容量を確認するための静荷重試験を実施してきた^[2]。これらの基礎実験の後、約 500kg の回転体を試験用超電導磁気軸受で浮上支持して、高速回転させる実験を行った。

2. 試験用超電導磁気軸受

本研究では第一段階として、液体窒素冷却した超電導バルク体を回転体側に配置し、固定側に超電導磁石を配置し、これをスラスト軸受に適用することを考えた。超電導バルク体は Gd-Ba-Cu-O 系材料で、直径 60mm、厚さ 20mm (新日鐵製 QMG[®]) のものを 2 個使用し、これらを回転軸を兼ねる液体窒素デューワー (回転試験用デューワー) に入れて使用する。超電導磁石は 2 個のコイルを上下に直列にして、それぞれを異極励磁するカスプ配置とした。Table 1 および Fig. 2 に試験用超電導磁気軸受の諸元と模式図を各々示す。

Table 1 Specification of superconducting magnetic bearing

HTS bulk as rotor		Superconducting magnet as stator	
Material	Gd-Ba-Cu-O	Material	Nb-Ti
Shape	Disk shape, φ60mm×t20mm, 2 disks	Properties	Room temperature bore φ120mm, Cusp field, Magnetic flux density 5T (Max)
Cooling method	Liquid nitrogen (77K)	Cooling method	Refrigerator direct (4K)

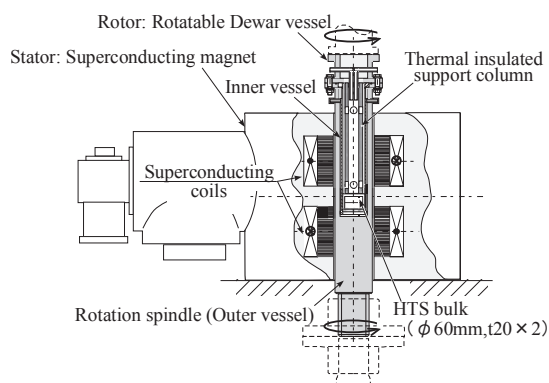


Fig.1 Schematic diagram of superconducting magnetic bearing

3. 実験装置

Fig. 2 に試験用超電導磁気軸受の回転試験装置を示す。

装置架台中央部に超電導磁気軸受のステータである超電導磁石が取り付けられる。超電導磁石の下には荷重変換器が挿入されており、軸受の負担荷重=発生電磁力を計測することができる。HTS バルクは回転試験用デューワーに挿入されており、これを超電導磁石の室温ボア内に配置することで超電導磁気軸受が構成される。回転試験用デューワーの下部には軸付きのフライホイールを取り付けられ、上部はカップリングを介して電動機の回転軸に接続される。回転試験用デューワー上下には径方向拘束のためのラジアル補助軸受が配置されている。

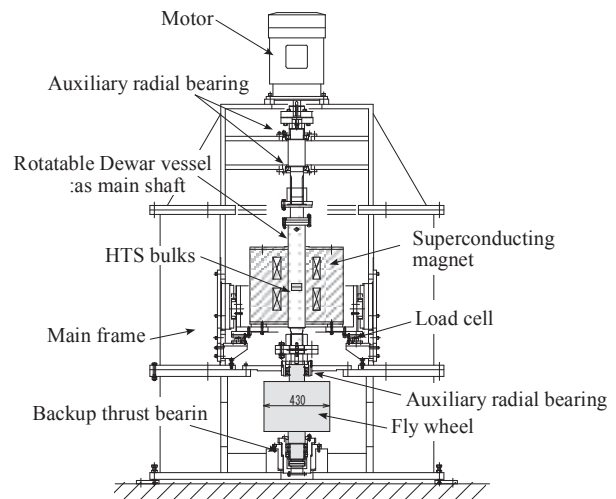


Fig.2 Schematic diagram of rotational test equipment

4. 回転試験結果

徐々に速度向上を行い、最高回転速度 3000rpm までの試験を実施した。試験においては、超電導磁石の支持荷重とロータ支持高さ (浮上高さ) を計測し、これらが回転させることによって大きく変化せず、安定していることを確認した。

また、回転試験の前後で、浮上高さに変化はなく、回転させることによる HTS バルクの特性劣化もなかった。

本研究の一部は国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

参考文献

1. H. Seino, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p. 11
2. H. Seino, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p. 262

二次エネルギーとしての電力・液体水素の比較検討 Secondary energy applications – electric power and liquid hydrogen

平林洋美, 槇田康博 (KEK); 新富孝和 (日大)

HIRABAYASHI Hiromi, MAKIDA Yasuhiro (KEK); SHIN TOMI Takakazu (Nihon Univ.)

E-mail: hiromihr@mac.com

1. はじめに

地表の植物等の炭酸同化作用によって固定されるCO₂の量は少なく、過去の太陽エネルギーの蓄積である石油、石炭などの化石エネルギーを大量に消費することによって、温室効果ガスCO₂は大気上層に停留する。すでに近年、異常気象と気温の上昇が指摘されている。これは、人類のエネルギー消費によって増加した炭素の増加量が、本来地球環境に備わっていた炭素循環に影響するまでに至ったことを意味している。

CO₂を排出しない再生可能エネルギーを利用するために、低密度で変動の大きい一次エネルギーからエネルギーキャリアである二次エネルギーに変換し、現代文明に利用しやすい形態にしなければならない。

水素は、クリーン・エネルギーの備蓄と輸送の観点から、電力の相補的役割を担える二次エネルギー媒体である。本報告では、二次エネルギーとして「電気」と「水素」特に「液体水素」との比較検討をし、来るべく水素エネルギー社会についての展望を試みる。

2. 二次エネルギーに求められる特性

- ① 様々な一次エネルギーから容易に産出できる。
- ② 各種形態のエネルギーへの変換効率が高い。
- ③ 消費者にとって取り扱いやすい。
- ④ 大量貯蔵から少量貯蔵まで可能である。
- ⑤ 長距離輸送から短距離輸送まで容易である。
- ⑥ 地球環境から個別環境まで有害物質を排出しない。

3. 電気エネルギー

電気エネルギーは、上記①、②、③、⑥に該当し、今後とも二次エネルギーの中に占める割合が増大していくものと考えられる。世界的にみても、BRICsなどの経済発展国での電気エネルギーの増加は著しいものになると予想される。しかしながら、電気エネルギーは大量貯蔵や長距離輸送ができないという最大の欠点を持ち、ピーク電力を想定した設備投資をしなければならず、また変動の大きな再生エネルギー発電普及の障害となっている。地球環境の点からはCO₂を排出しない原子力あるいは自然エネルギーの利用を増やすことが求められる。

3. 水素エネルギー

「水素」を「電気」とともに使用することで、二次エネルギーに求められる特性をほぼ満足させることができる。水素は貯蔵して輸送することができ、電気化学システムで直接電気と相互変換でき、排出される水は無害である。Fig. 1 に水素エネルギーを二次エネルギーに加えたエネルギーシステムを示す。

クリーンなエネルギー源として期待されている水素エネルギー社会の構築には、製造、輸送、備蓄について十分な検討とインフラストラクチャの整備が必要である。以下に述べる理由から、水素を利用する際に、液体水素の形態で備蓄、輸送をすることが有効であると考えられる。

3.1. 水素の貯蔵

水素は高圧ガス、液体水素、高ハイドロ・カーボン、各種吸蔵合金の形で備蓄できるが、体積あたりの備蓄モル数が高く、含有量も高いのは、液体水素である。液体水素貯蔵の欠点であるボイルオフは、水素蒸発 0.3%/day 以下の容器が実証されているおり、少量でも蒸発水素で発電すれば無駄にはならない。移動体(自動車)など動力利用には適している。

3.2. 水素の輸送

通常水素の輸送には、配管によるもの(比較的短距離)、高



Fig. 1 Hydrogen as secondary (manufactured) energy plays a complementary role vis-à-vis electric power.

圧シリンダー・カードル輸送(重い割に、軽い水素はあまり積めない、最も危険な方法)、液体水素コンテナによるトレーラー輸送(低圧、コンパクトで大量の高純度水素が運べる)の三つの方法がある。

欧州ではパイプライン輸送が発達しているが、災害列島である我が国においては、長距離水素パイプラインは未発達である。パイプライン輸送のためには相応の安全性を考慮した設備が必要である。遠距離輸送または不定期な大口需要に対しては、液体水素コンテナによるトレーラー輸送が推奨される。

3.3. 超伝導機器冷却

他の水素形態に対して決定的に有利な点は、冷熱を利用して超伝導機器を冷却できることであり、液化コストという欠点を補うことができる。強磁界、電気抵抗ゼロを生かした新たな応用も検討されている。

4. まとめ

Table 1 は、液体水素と電力の特徴を二次エネルギーとしてまとめてみた。Conversion efficiency from primary energy の算出は、LH₂ は貯蔵が可能なことから、水素を自然エネルギー発電(効率1とする)による水の電気分解(効率 0.9)によって生成し、液化(効率 0.3-0.5)とした。夫々が有する長所を生かし、また超伝導技術との組合せをすることによって、液体水素を有効に利用するシステムが確立できれば、地球環境に優しいエネルギー社会を築くことが可能となるであろう。

Table 1 Comparison between liquid hydrogen and electric power.

	LH ₂	Electric Power
Storage	Yes	No
Handling	Container (0.3%/d)	Easy
Transportation	Piping, Tank lorry	Power cable with loss DC for long distance
CO ₂ emission	Zero	Yes with fossil fuel
Safety	Combustible	Electrification
Conver. eff. from primary energy	10 ~ 23%	~ 36 %
Availability	Efficient	Not efficient (~60%)

参考文献

1. H. Hirabayashi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 75 (2006) p. 54
2. H. Hirabayashi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p. 143

JT-60SA におけるプラズマ平衡磁場コイルの支持構造設計

Latest support structure design of the plasma equilibrium coils in JT-60SA

土屋 勝彦、枝谷 昌博、木津 要、吉田 清、松川 誠 (原子力機構)

TSUCHIYA Katsuhiko, EDAYA Masahiro, KIZU Kaname, YOSHIDA Kiyoshi, MATSUKAWA Makoto (JAEA)

E-mail: tsuchiya.katsuhiko@jaea.go.jp

1. はじめに

JT-60SA 装置のプラズマ平衡磁場(EF)コイルシステムは、高磁場用導体を用いている2つのダイバータ用コイルと、低磁場用導体を用いるその他4つのコイル、あわせて計6つのコイルで構成されている。全ての EF コイルはトロイダル磁場(TF)コイルケースに設置される。TF コイルへの接続部において、EF コイル巻線を挟むように上下のクランプで固定しているが、本巻線端部に生じる集中応力が問題となっていた。

2. プラズマ平衡磁場(EF)コイル支持の基本構造

EFコイル支持構造物はすべてのTFコイルに設置するため、EFコイル1つあたり18個の支持構造物を持つことになるが、EF3とEF4は口径が小さいので本構造物のための空間が制限されることから、TFコイル1つおきに設置する9個だけで支持される。以下、支持の制約に加えて電磁力も大きいことから、機械的条件が最も厳しくなるEF4に着目する。

Fig.1にEF4における支持構造図を示す。本構造に類似した構造は、KSTAR[1]等においても採用されている。ここで、クランプと巻線の間には、冷却時の収縮差によるギャップが生じるほか、巻線は初期励磁(IM)時に22MNの上向きの電磁力を受けて下側クランプから離れる傾向があるので、テンションロッドにより予め荷重をかけて(初期締付)、これらのギャップをなくす必要がある。

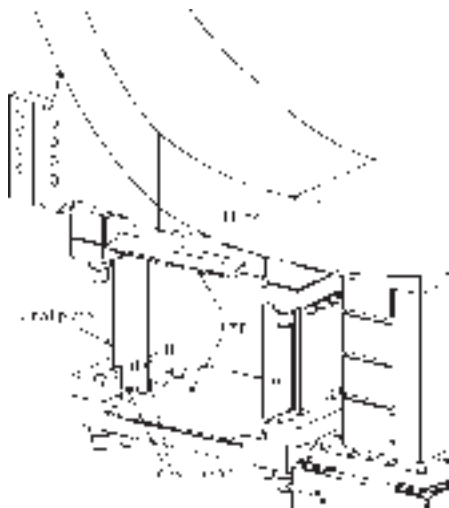


Fig.1 Schematic view of EF4 support structure with the TF coil case (Winding pack is not shown)

3. クランプ・巻線間の構造の工夫

本構造では、テンションロッドが巻線の端部に設置されているため、その近傍に局部的に荷重が集中する。これを無くするため、巻線と上下クランプの間に挟む「かまぼこ」型のシムを新たに案出した。Fig.2にその概念図とシムのスケールについて示す。ここでシムは最大厚さを4mmとし、その曲面形状は、以下の考えに基づいて決定した。

クランプは、テンションロッドからの荷重により、シムの頂点を支点として片持ち梁のような変形を受ける。一般に、片持ち梁の変形量(図では鉛直方向)は支点からの長さの三乗に比例

することから、変形したクランプの面をシム表面全体と接触させるため、クランプ中心を起点とする三次関数曲線に沿うような形状とした。また、クランプとシム間のギャップは端部で1.5mmとした。

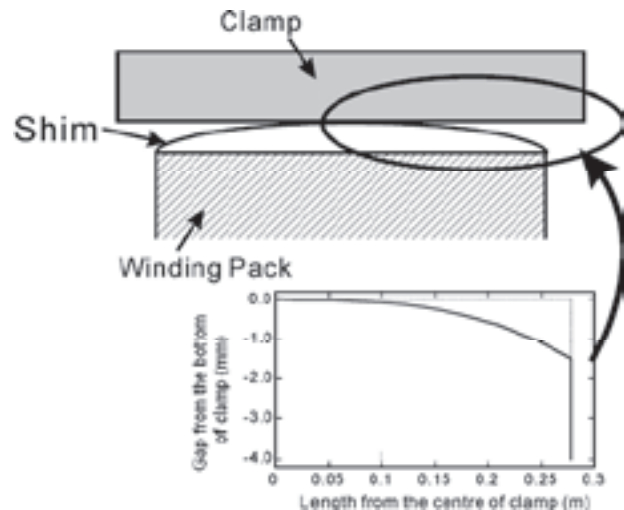


Fig.2 Shape of shim between clamp and winding pack

本構造による応力分布への効果を調べるため、初期締付、室温から4Kまでの冷却収縮およびIM時の電磁力荷重を考慮し、FEM解析を行った。Fig.3に、Fig.2で示した形状のシムを設置した場合と入れない場合それぞれにおける、巻線部上部表面に生じる圧力分布を示す。この結果から、本シムによって、巻線への圧力を分散できることがわかった。

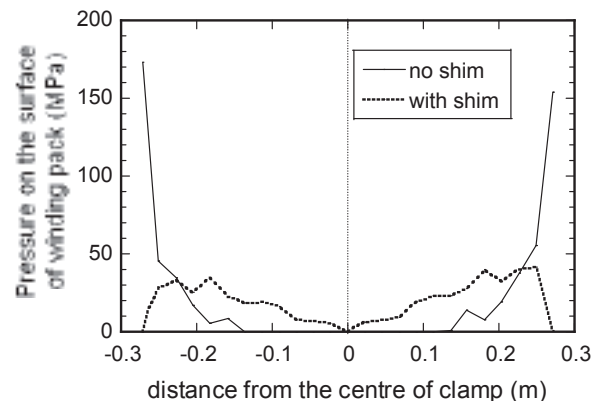


Fig.3 Pressure profile on the surface of winding pack in the cases of installing shim and no shim

4. まとめ

新たに考案したシムをEFコイル支持構造物に用いることで、巻線上に生じる圧力の局在化を緩和できることが明らかになった。これは、本構造の有効性を示すものである。今後は、シム形状の最適化に向けた詳細解析を進めていく。

参考文献

- H. J. Ahn, et al.: IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 14 (2004) p.1423

JT-60SA のプロトタイプ型 NbTi ケーブル・イン・コンジット導体の臨界電流測定

Critical current measurement of prototype NbTi cable-in-conduit conductor for JT-60SA

木津 要, 土屋 勝彦, 星 亮, 吉田 清, 松川 誠 (JAEA); 尾花 哲浩, 高畑 一也, 濱口 真司, 柳 長門, 今川 信作, 三戸 利行 (NIFS)
 KIZU Kaname, TSUCHIYA Katsuhiko, HOSHI Ryo YOSHIDA Kiyoshi, MATSUKAWA Makoto (JAEA); OBANA Tetsuhiro,
 TAKAHATA Kazuya, HAMAGUCHI Shinji, YANAGI Naga to, IMAGAWA Shinsaku, MITO Toshiyuki (NIFS)
 E-mail: kizu.kaname@jaea.go.jp

1. はじめに

JT-60SA 装置の 6 個のプラズマ平衡磁場 (EF) コイルの最大運転電流と最大経験磁場は、20kA、6.2T である[1]。導体は NbTi ケーブル・イン・コンジット型導体であり、交流損失低減のために、素線にニッケルめっきが施されており、さらに、中心スパイラルが設けられている。導体は、円形パイプに撚線を挿入した後、矩形に成型することで製作する。過去、このような導体の性能は確認されておらず、導体の安定性や、素線性能の劣化が問題とされていた。

一方、実機製作においては、超伝導状態での導体性能を確認するためには、想定される運転条件での分流開始温度 (Tcs) 測定が必要である。NIFS の試験設備は磁場と電流値から本試験を行うのに十分な能力があるため、JAEA と NIFS との共同研究として試験設備とサンプルの設計・製作を進めてきた[2]。H19 年度は試験設備が実機導体試験に適用できることの確認、実機導体の性能予測を目的に、プロトタイプの EF 導体サンプルを製作し試験を行った。

2. サンプル

Table 1 はプロトタイプ EF 導体と実機導体の諸元を示している。プロトタイプ導体、実機導体はそれぞれ、486 本および 450 本の NbTi 素線で構成される。プロトタイプ導体サンプルは Fig. 1 に示すラケット型であり、その直径は 300mm である。スプリットコイルにより、この円環部導体に一樣な磁場を印加

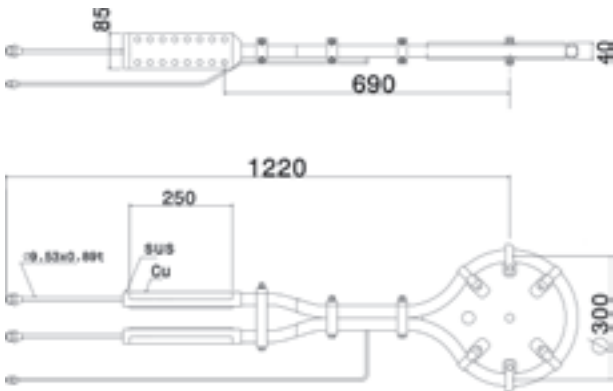


Fig. 1 Prototype sample

Table 1 Conductor Parameters

	F	E
	conductor	Prototype conductor
Type of strand	NbTi	←
Cable dimensions (mm)	21.8x21.8	22.7x22.7
Central spiral outer x inner diameter (mm)	9x7	←
Conductor outer dimensions (mm)	28x28	←
Jacket material	JIS SUS316LTP	←
SC strand diameter (mm)	0.829	←
SC strand cu:non-cu	>1.95	←
Cabling pattern	3x5x5x6	3x3x3x3x6
SC strand number	450	486
Local void fraction (%) in strand bundle	34	←

することで、最大経験磁場に位置する導体長を最終撚りピッチより長くすることができる。温度コントロールされた超臨界圧ヘリウム (SHe) が直線部より導入され、ターミナル部より排出される。

3. 試験結果

試験は、SHe 流量 3g/s でおこない、4.8 - 7.0 T, 5.78 - 7.15 K の範囲での Ic-B-T 特性を取得した (Fig. 2)。図中の磁場は導体中心磁場を示している。試験は、温度と外部磁場固定での Ic 測定と、電流と外部磁場固定での Tcs 測定の 2 種類を行った。両者は一致し、試験設備が実機導体試験に使用可能であることが示された。

Tcs は導体中心磁場 6.12T ($B_{max}=6.2T$)、通電電流 21.6kA において 6.22K となった。これより、素線数が 450 本の実機導体の Tcs が、20kA-6.2T において 6.22K となることが予想され、目標性能を達成できる見通しを得た。また、素線の Ic に導体中の素線の本数をかけた値を破線で示した。6.2T における素線の Tcs と導体の Tcs との差は、導体性能を最大経験磁場で評価できると仮定した場合で 0.02K、導体中心磁場で評価した場合でも 0.07K となり、Ni めっき、中心スパイラル、導体成型などによる大きな劣化がないことがわかった。これより、同様の導体設計としている実機導体設計の妥当性を確認できた。

4. まとめ

- (1) プロトタイプ EF-H 導体の試験を行い、NIFS の試験設備が実機導体試験に有効であることを確認した。
- (2) 運転磁場 6.2T における、導体の Tcs の劣化は 0.02-0.07K 程度であり、導体構造と製作方法による性能の大きな劣化は観測されず、実機導体設計の妥当性を確認できた。

参考文献

- K. Kizu, et al.: "Conductor Design of CS and EF Coils for JT-60SA", Proc. of MT-20 (2007) to be published.
- 尾花、他: 2008 年春季低温工学・超電導学会、1B-p07

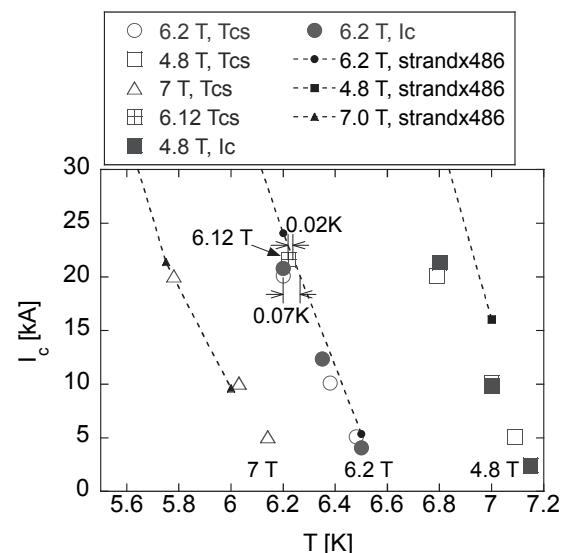


Fig. 2 Ic-T characteristic of prototype conductor

JT-60SA 導体のための NIFS 超伝導導体試験装置の改造

Upgrading the NIFS superconductor test facility for JT-60SA conductors

尾花 哲浩、高畑 一也、濱口 真司、柳 長門、三戸 利行、今川 信作(NIFS)

; 木津 要、土屋 勝彦、星 亮、吉田 清(原子力機構)

OBANA Tetsuhiro, TAKAHATA Kazuya, HAMAGUCHI Shinji, YANAGI Nagato, MITO Toshiyuki, IMAGAWA Shinsaku(NIFS);

KIZU Kaname, TSUCHIYA Katsuhiko, HOSHI Ryo, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA)

E-mail: obana.tetsuhiro@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

核融合科学研究所(NIFS)の大型超伝導導体試験装置を使用して、JT-60SA プラズマ平衡磁場(EF)コイル用ケーブル・イン・コンジット(CIC)導体を試験する計画が、2007年度からNIFSと日本原子力研究開発機構(JAEA)の共同研究で開始された[1]。大型ヘリカル装置(LHD)に使用される超伝導導体を開発するため、1992年に土岐サイトに設置された本試験装置は、最大9T環境下において試験導体を75kAまで通電することが可能であるが、これまでは主に浸漬冷却型超伝導導体に対応した装置であった[2]。そこで、EFコイル用CIC導体の試験を可能にするため、本試験装置を強制冷却型導体に対応できるように改造を行った。本講演では、改造を行ったNIFS超伝導導体試験装置の性能について発表する。

2. 導体試験装置の改造

Fig. 1に、改造した超伝導導体試験装置の概略図を示す。本改造では、CIC導体の試験に対応するために、トランスファーチューブを導体試験装置とヘリウム液化冷凍設備の間に設置して、超臨界圧ヘリウム(SHe)用供給及び回収ラインを新たに設けた。トランスファーチューブから試験装置へ供給されたSHeは、サンプル導体へ供給される前に、液体ヘリウム(LHe)に浸された熱交換器を介して、4.5Kまで冷却される。本導体試験では、各温度におけるサンプル導体の臨界電流値、及び電流分流開始温度の測定を実施するために、SHe温度の制御が求められた。そこで、4.5Kまで冷却されたSHeを、サンプル導体への冷媒供給用配管に取り付けたフィルムヒータにより加熱し、SHe温度の制御を行った。その際、外部磁場発生用スプリットコイルを冷却する目的で、クライオスタットに貯められたLHeから熱絶縁するために、サンプル導体はスプリットコイルの内側で断熱容器に収納し、ガスヘリウム雰囲気中に置いた。

3. 導体試験装置の性能

本導体試験では、各温度におけるサンプル導体の臨界電流値測定、及びサンプル導体の電流分流開始温度測定を実施した。電流分流開始温度の測定では、サンプル導体の通電電流値を固定し、供給冷媒(SHe)の質量流量を約3g/sに保持した状態で、サンプル導体の温度制御を行った。その結果、サンプル導体温度を0.05K刻みで温度制御することができた。また、電圧波形を計測しているサンプル導体内の試験領域において、サンプル導体温度を均一に制御できることを確認した。

改造した導体試験装置での試験条件範囲を調べるために、EFコイル用CIC導体の定格流量5g/sにおける温度制御試験を行った。Fig. 2に入口冷媒温度と質量流量の変化を示す。本試験により、入口冷媒温度を4.5Kから7Kまで安定に制御できることを確認した。今回はバルブ開度一定で試験したため、温度が変化する過程で流量の変動が見られた。バルブの流量制御についても今後導入を検討する。

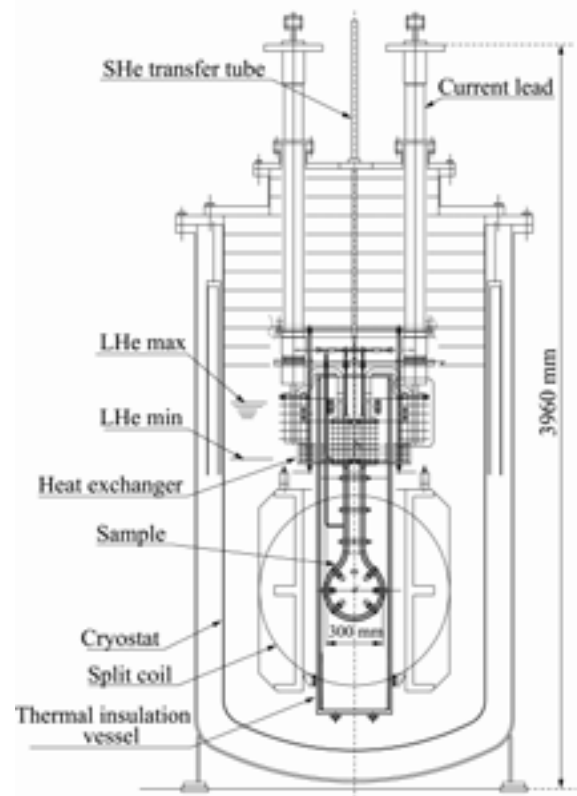


Fig. 1 NIFS superconductor test facility.

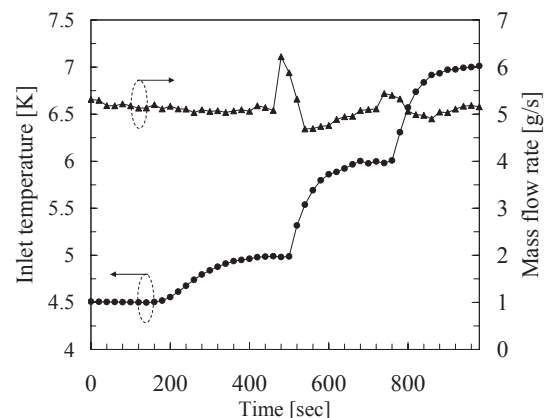


Fig. 2 Performance test result.

参考文献

1. 木津、他: 2008年春季低温工学・超電導学会、1B-p06
2. J. Yamamoto, et al.: Fusion Engineering and Design, Vol. 20 (1993) pp.147-151

JT-60SA マグネット用ヘリウム分配システムの概念設計

Conceptual design of helium distribution system for the JT-60SA magnet

米田 昌生, 土屋 勝彦, 木津 要, 吉田 清, 松川 誠 (原子力機構)

KOMEDA Masao, TSUCHIYA Katsuhiko, KIZU Kaname, YOSHIDA Kiyoshi, MATSUKAWA Makoto (JAEA)

E-mail: komeda.masao47@jaea.go.jp

1. はじめに

原子力機構のJT-60Uのトカマク本体コイルを超伝導化する計画が日本と欧州連合(EU)間の共同プロジェクト「サテライトトカマク(JT-60SA)」として進められている。JT-60SA に用いられる超伝導コイル及び高温超伝導電流(HTS)リード、サーマルシールド、クライオポンプは、ヘリウム冷凍設備(ヘリウム冷凍機、循環ポンプ)から冷却される。ヘリウム分配システムは冷凍設備から供給されるヘリウムを各負荷に分配するシステムで、配管および弁、コイル端子箱(Coil Terminal Box : CTB)、バルブボックスから構成される。各負荷の冷却条件を満足するようなヘリウム分配システムの概念設計を示す。

2. システム熱負荷

JT-60SA のコイルなどの平均熱負荷は 3.4kW に対し、プラズマ運転時(100 s)は 13 kW まで増加する。本システムの熱負荷を Table 1 に示す。供給温度は対象に応じ 4 K、50 K、80 K の3温度が要求されている。超伝導コイルとヘリウム循環ポンプは 4 K の熱負荷となる。ヘリウム循環ポンプの熱負荷は、流量と圧損が大きいほど大きくなる。高温超伝導電流リードには 50K のヘリウムが供給される。サーマルシールドは 80 K が供給温度であるが、真空容器のベーキング時(200 °C)には、129kW まで熱負荷は増加する。

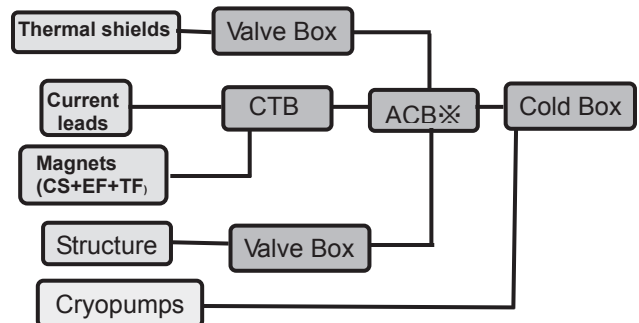
昨年までの熱設計と比較して、実験条件の見直しにより核発熱が約 1/3 となった。その結果、コイル関係の熱負荷は 6.5 kW から 3.4 kW まで下がった。

Table 1 Heat Load in the JT-60SA Cryogenic System.

Components		Heat load (kW)	Mass flow rate(g/s)	Pressure drop (MPa)
4K He	Magnets	TF	0.3	1296
		EF	0.35	80
		CS	0.77	832
		Structure	1.93	1755
	SHe-circulation pump	3.5	-	-
	Cold compressor	1.4	-	-
	Cryopumps	0.3	-	-
Sub total		8.6		
50K He	HTS leads	-	34	-
80K He	Thermal shield & others	Normal	38.8	373
		Baking	129	620

3. 構成機器と装置レイアウト

超伝導コイルおよび支持構造物は、低温循環ポンプを用いて4Kヘリウムを循環させている。電流リードおよびサーマルシールドは、ヘリウムガスをコールドボックスから直接供給する。電流リードへは 50K で供給され、300 K で冷凍機へ戻る。サーマルシールドは80Kで供給され、通常、戻り温度は100Kであるがベーキング時には戻り温度は 120 K まで上昇するため、流量の調整が必要である。そのため、各機器へヘリウムの分配を行うCTBおよびバルブボックスを配置している。各機器との関係を Fig. 1 に示す。



※ACB:Auxiliary Cold Box

Fig 1 Block diagram of helium distribution system

4. 装置配置

トロイダル磁場(TF)コイル、平衡磁場(EF)コイル、中心ソレノイド(CS)から出る電流フィーダと冷却配管はCTB、バルブボックスに連絡する。クライオスタット内は、主に上部にコイルのターミナルが集まっているため、2個のCTBを配置し、下部に1個のCTBを配置した。

CTBの中に配置されている高温超伝導電流リードの漏れ磁場(30 mT)による影響を少なくするために、CTBは中心から12mの位置に保った。

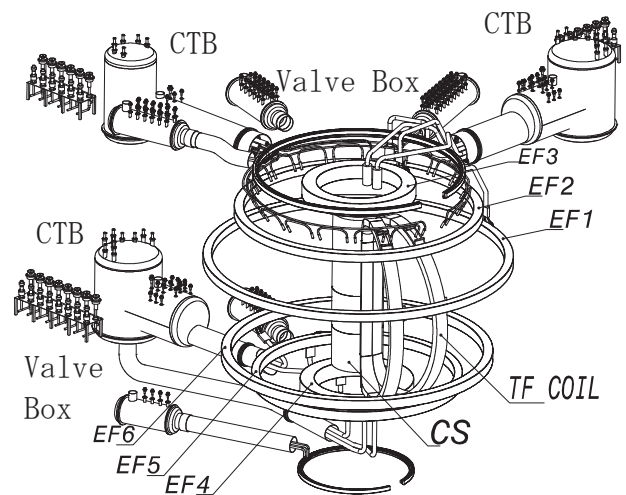


Fig. 2 Layout of magnet system, CTB and valve box

5. まとめ

各機器の熱負荷を満足するために機器の設計や配置を検討して、ヘリウム配分システムの概念設計を行った。この結果をもとに、CTBやヘリウム冷凍設備の製作を担当するEU側の担当と協議を行う。

液体水素中における CP Ti の変形挙動に及ぼす核沸騰・膜沸騰遷移の影響

Effect of transition from nucleate to film boiling on deformation behavior of CP Ti in liquid hydrogen

柴田 浩司, 緒形 俊夫, 由利 哲美(NIMS); 藤井 秀樹, 大宮 慎一(新日鐵); Nyilas Arman(CEME)
SHIBATA Koji, OGATA Toshio, YURI Tetsumi (NIMS); FUJII Hideki, OMIYA Shinichi (NSC); Nyilas Arman(CEME)
E-mail: SHIBATA.koji@nims.go.jp

1. はじめに

液体ヘリウム中に比較して、液体水素中での引張変形挙動に関する研究は圧倒的に少ない。一方、今後、超電導マグネット、燃料電池自動車などで液体水素の利用が一層広がるものと考えられる。そうした中で十分な信頼性、安全性を確保するためには、構造材料の液体水素中における少なくとも引張変形挙動を十分理解しておくことが必要である。前報[1]では300系ステンレス鋼の液体水素中での変形挙動を検討したが、本報では CP チタン (ASTM Gr.2) の液体水素中での引張試験の計算機シミュレーションを行い、実際に観察される引張り変形挙動と比較検討した。

2. 方法

引張試験は、平行部の長さ 35mm、直径 7mm の丸棒試験片を用いて、0.2%耐力の測定までは平均ひずみ速度が $2.4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、それ以降は $9.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ となるようなクロスヘッド速度一定条件下で行った。計算機シミュレーションの方法は、著者らのこれまでの方法と同様である。計算時間短縮のため、ほとんどのシミュレーションは平均ひずみ速度がほぼ $9.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ となるようなクロスヘッド速度一定条件下で行い、必要に応じて、それより遅いクロスヘッド速度においても計算した。本研究では、試験片と冷媒の温度差と熱流束との間の関係を Fig.1 に示すように、様々変化した。(1)は Brentari ら[2]の文献に従ったもので、これまでのシミュレーションにおいて用いてきたものである。30%を越えるような大きな伸び変形まで計算すると時間がかかるので、前報[1]同様、最大荷重点付近における応力-伸び曲線は、予め最大荷重点付近まで変形した材料を仮想して、あらためて引張ったときの変形挙動をシミュレートした。

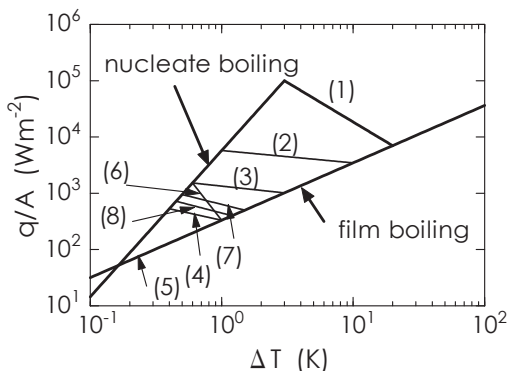


Fig.1 Various assumed curves of the transition from nucleate to film boiling on the specimen surface in liquid hydrogen. Curve (1) is after Brentari and Smith[2]. ΔT is the temperature difference between specimen surface and the coolant. q/A is heat flux.

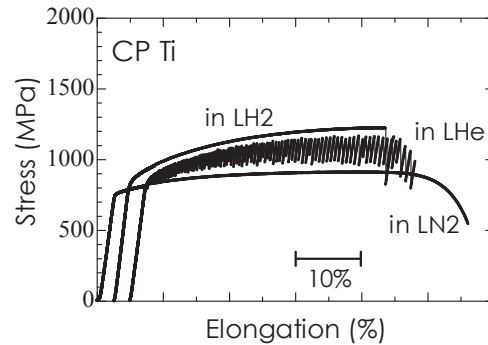


Fig.2 Stress-elongation curves of CP Ti in liquid helium, hydrogen and nitrogen (obtained by practical tensile tests).

3. 結果および考察

液体水素中での応力-伸び曲線を、液体ヘリウム、液体窒素中での応力-伸び曲線と比較して、Fig.2に示す。液体ヘリウム中では、塑性変形が開始すると同時にセレーションが観察されるが、液体水素中では最大荷重点近くまでセレーションは観察されず、最大荷重点近くで大きな荷重低下が1度生じてから再び荷重が増加する過程で破断に至る。2本試験したもう1本の試験片の場合は、最大荷重点近くで突然破断した。

以上のような変形挙動を、Brentari ら[2]による冷媒中への熱伝達に関するデータを用いて計算機シミュレーションを行うと、液体ヘリウム中、液体窒素中の変形挙動はうまく再現できるが、液体水素中の変形挙動はうまく再現されない。そこで、Fig.1に示すように核沸騰から膜沸騰への遷移の様子を変えて計算したところ、(8)の場合、最高荷重点付近で大きなセレーションが再現した。転位の移動の活性化エネルギーを 18000 J/mol から 12000 J/mol と小さくすると、(4)、(5)、(8)で、最高荷重点付近で大きなセレーションが再現したが、(4)の場合、塑性変形量の小さいところでもセレーションが生じてしまい、実際の引張結果と相違する。

4. まとめ

CP Ti の液体水素中における変形挙動を計算機シミュレーションにより解析した結果、試験片表面での核沸騰・膜沸騰遷移が、Brentari ら[2]によって報告されているより小さな温度差で生じやすい可能性が示唆された。

参考文献

1. K. Shiabta et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007), p.243.
2. E. G. Brentari and R. V. Smith, Advances in Cryogenic Engineering Materials, Plenum, New York, 10(1965), p.325-341.

ステンレス鋼の疲労特性に及ぼす低温高圧水素環境の影響

Effect of High-pressure Hydrogen on Fatigue Properties of Stainless Steels at Low Temperatures

緒形 俊夫 (NIMS)

OGATA, Toshio (NIMS)

E-mail: OGATA.Toshio@nims.go.jp

1. はじめに

燃料電池車の構造用部材として検討されているオーステナイト系ステンレス鋼は、低温で加工誘起マルテンサイト変態を生じるため、水素脆化感受性が増すとみなされているが、高圧水素中でも 10 数%の破断伸びを示すことから、実際の使用上は問題が無いとも考えられる。そこで本報告では、高圧水素環境下で使用される材料の水素脆化感受性を簡便に評価する方法として考案した、試験片内の微小空隙に極限環境を設定する方法¹⁾を用い、オーステナイト系ステンレス鋼について、室温と低温において 70MPa 高圧水素環境下の疲労試験を行い、高圧水素環境の疲労特性への影響を調べた。

2. 試験方法

供試材は市販の SUS304、SUS304L 及び SUS316L の 13mm φ 丸棒材で、1050℃、5min の溶体化熱処理を施した。簡便な高圧水素下材料試験法として試験片内の微小空隙に高圧水素環境を設定する方法(特願 2006-320281:「材料試験装置と材料試験片」、関連特許:特願 2006-060027「材料試験片及びその製造方法」)を用いた。¹⁾⁻⁵⁾砂時計型疲労試験片の最小直径部の外径は 6.0 mm で、微小空隙の内径は 2 mm である。試験片内の微小空隙に水素或いは参照ガスとしてヘリウムガスをボンベから封入した。ボンベ圧は 11~15 MPa で、およそ 10 MPa 級と称する。手押し式小型増圧装置を用いて 70 MPa を充填した。配管内には線材を詰めて極力空間体積を小さくして充填するガス量を減らした。充填後、試験片を高圧系から切り離し漏れを確認した。Fig.1 に、70MPa の水素を充填し切り離れた試験片部の様子を示す。

試験温度は、市販の低温冷凍機により冷却温度制御したアルコール中で行った。疲労試験の試験周波数は 10 Hz で、引張-引張の R=0.01 で行った。

3. 試験結果

Fig. 2 に SUS316L の室温及び 190 K の 10 MPa と 70 MPa 高圧水素中とヘリウム中の S-N 曲線を示す。なお、SUS316L の室温と 190 K の 0.2%耐力はそれぞれ 300 MPa と 390 MPa である。室温での 0.2%耐力が試験の最高応力となる 150 MPa の試験応力では、水素による影響は殆ど見られず、水素中でも破断に至らない。これは、190 K での 0.2%耐力が試験の最高応力となる 200 MPa の試験応力も同様である。試験応力が、0.2%耐力より高くなると、水素と水素圧の影響が見られ、水素圧の高い方が寿命が短くなる傾向を示した。前報⁴⁾の引張試験では、190 K 付近で伸びと絞り極小となり、顕著な水素環境の影響が見られたが、疲労試験では、低温における強度の増加が疲労特性の増加となっている。オーステナイト系ステンレス鋼においては、0.2%耐力より小さい応力での水素の影響は小さいと考えられる。

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)「水素社会構築共通基盤整備事業」プロジェクトにおいて実施した。

参考文献

1. Ogata: Collected Abstracts of the 2006 Spring Meeting of JIM (2006), p.230
2. D.Sun, et al.: Materials Science and Technology, Vol.17, 302-308, (2001)
3. Ogata, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 75 (2006) p.275
4. Ogata, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.197
5. Ogata, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.245

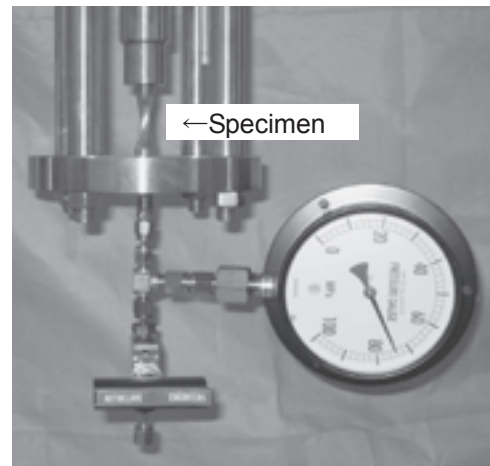


Fig.1 Fatigue specimen with 70 MPa hydrogen pressure.

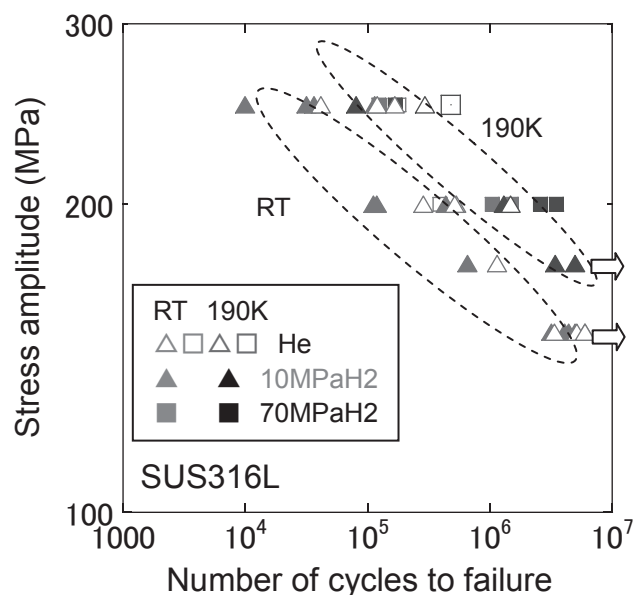


Fig. 2 Effects of hydrogen pressure and specimen temperature on fatigue properties of SUS316L.

極低温における Ti-6Al-4V ELI 合金の破壊靱性と高サイクル疲労特性 Fracture Toughness and High-cycle Fatigue Properties of Ti-6Al-4V ELI Alloy at Cryogenic Temperatures

由利 哲美、小野 嘉則、緒形 俊夫 (物質・材料研究機構)
Tetsumi Yuri, Yoshinori Ono, Toshio Ogata (NIMS)
E-mail: YURI. Tetumi@nims.go.jp

【緒言】 Ti-5Al-2.5Sn ELI 合金 (以後、Ti525 ELI と記す) と並びチタン合金の代表的な Ti-6Al-4V ELI 合金 (以後、Ti64 ELI と記す) は、これまでに多方面での使用実績がある。しかしながら、これまでに極低温における 10^7 回付近までの長寿命域における疲労特性の報告例は少ない¹⁾。また、一般的にチタン合金では高強度になるほど破壊靱性値の低下が懸念される¹⁾。

本研究では、Ti64 ELI 鍛造材を用いて極低温において引張試験、破壊靱性試験および 10^7 回までの高サイクル疲労試験を行い、Ti525 ELI 鍛造材²⁾との各機械的特性の比較・検討を目的に行った。

【実験方法】 供試材は、AMS 4930 E に準拠した市販材の Ti64 ELI 鍛造材 ($\phi 300$) である。 α 相は等軸、その平均粒径は約 $17 \mu\text{m}$ である。各試験は、液体ヘリウム温度 (4 K)、液体窒素温度 (77 K) および室温 (293 K) で行った。疲労試験片は、砂時計型試験片で試験片表面は最終的にエメリー紙 600 番で軸方向に仕上げたものを用いた。疲労試験は、正弦波での荷重制御にて行い応力比 $R=0.01$ とした。試験周波数は 4 K では 10^5 回までは 4Hz で行い、破断しなかった試験片についてはその後 10Hz に加速して試験を行った。293 および 77 K では 10~15Hz で行った。

【結果】 引張試験の結果を Table 1 に示す。本供試材の Ti64 ELI の方が Ti525 ELI²⁾ に比較し、 $\sigma_{0.2}$ で 10~16%、 σ_B で 11~13% 程度高い値となっている。Fig.1 に各試験温度における破壊靱性値を示す。試験温度の低下とともに破壊靱性値は低下しているが、両者の値に大差は見られない。4 K における S-N 曲線を Fig.2 に示す。Ti64 ELI の方が 10^6 回付近までは Ti525 ELI²⁾ より疲労強度は高くなっているが、それより長寿命側では若干低下が見られる。また、293 K では Ti525 ELI²⁾ の方が高い疲労強度を示したが、77 K においては Ti64 ELI の方が高い値を示した。以上より、本供試材 Ti64 ELI の極低温における各機械的特性は、Ti525 ELI²⁾ に比較し同水準もしくはそれ以上と良好であった。

【参考文献】

- (1) K.Nagai, et al. : ISIJ International 31 (1991) p.882
- (2) NIMS SPACE USE MATERIALS STRENGTH DATA SHEET No.1: National Institute for Materials Science, Japan (2003)

Table 1 Tensile properties of Ti-6Al-4V ELI and Ti-5Al-2.5Sn ELI²⁾ alloys.

Materials	Unit:MPa					
	4 K		77 K		293 K	
	$\sigma_{0.2}$	σ_B	$\sigma_{0.2}$	σ_B	$\sigma_{0.2}$	σ_B
Ti64 ELI	1473	1541	1269	1367	766	838
Ti525 ELI	1262	1390	1139	1206	693	740

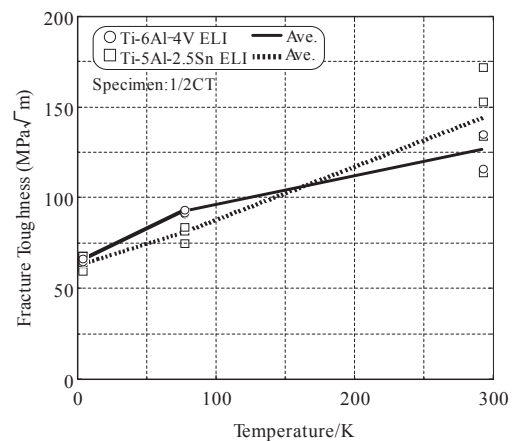


Fig.1 Temperature dependence of fracture toughness of Ti-6Al-4V ELI and Ti-5Al-2.5Sn ELI²⁾ alloys.

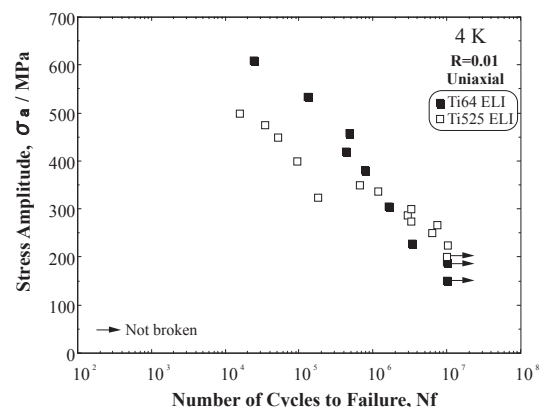


Fig.2 S-N curves of Ti-6Al-4V ELI and Ti-5Al-2.5Sn ELI²⁾ alloys at 4 K.

強磁場下における準安定オーステナイト系ステンレス鋼の極低温破壊挙動

Cryogenic fracture behavior of metastable austenitic stainless steel in a strong magnetic field

進藤 裕英, 成田 史生, 鈴木 雅人(東北大工)
 SHINDO Yasuhide, NARITA Fumio, SUZUKI Masato (Tohoku University)
 E-mail: shindo@material.tohoku.ac.jp

1. Introduction

Metastable austenitic stainless steels are used in the superconducting magnet structures. In this application the alloys sustain high stresses in high magnetic fields at liquid helium temperature (4 K). This necessitates complete characterization of the fracture and deformation behavior of these alloys at the anticipated operating conditions. These metastable austenitic stainless steels can undergo strain-induced martensitic transformation at cryogenic temperatures¹⁾. Also, magnetic fields tend to raise the martensitic transformation temperature and to increase the amount of transformation in ferrous alloys. In this paper, we investigate the effect of magnetic field on the cryogenic fracture properties of metastable austenitic stainless steel SUS 304.

2. Experimental procedure

The commercial SUS 304 was used in this work. SUS 304 is metastable with respect to austenitic-to-martensitic transformation and undergo a phase transition from an fcc structure to a more stable bcc martensite on deformation at low temperatures.

The CT specimen was 5 mm thick (B) and 25 mm wide (W), i.e. $0.2TCT^2$). The specimens were fatigue precracked at room temperature and 77 K with final stress intensity factor range of $30 \text{ MPam}^{1/2}$. The precracking was continued to the original-crack-length-to-width ratio $a_0/W = 0.6$. After precracking, side-grooves were machined on all specimens to a net thickness (B_N) reduction of 20%.

A 30 kN axial loading capacity servo-hydraulic testing machine was employed. A cryocooler-cooled superconducting magnet, 10 T (T: Tesla) capacity, with a 100 mm diameter working bore was also used to create a static uniform magnetic field of magnetic induction $B_0 = 6 \text{ T}$. Low temperature environment was archived by immersing the load frame, specimen, and clip gage in liquid helium (4 K). Before J_{IC} testing, tensile tests were conducted on the SUS304 specimens in accordance with ISO 19819, and Young's modulus E , Poisson's ratio ν , 0.2% proof stress $\sigma_{0.2}$, ultimate tensile strength σ_u and fracture strain ϵ_f were measured. The ferrite content was also measured using a conventional ferrite tester equipment (Ferrite scope). The 4 K J_{IC} testing was then done. The specimens were loaded at a constant clip-gage displacement rate of 0.12 mm/min. The single-specimen unloading compliance method described in JIS Z 2284 was used to monitor the crack growth and obtain the fracture toughness parameters. The specimen was periodically unloaded by approximately 10% and then reloaded to a higher J level. The slope of the unloading curve was measured and related to crack length (a) by compliance, and the crack length was used to obtain the crack extension increment ($\Delta a = a - a_0$). J was calculated from the load-displacement record and specimen dimensions.

After J_{IC} testing, the final physical crack length a_p , the distance from the load line to the final crack front, was measured with a digital microscope. The dimension a_p was taken as the average of nine physical measurements a_{pi} ($i = 1-9$) taken at nine equally spaced points centered about the specimen centerline and extending to $0.005W$ from the root of the side groove specimen. The two near-surface measurements

were average into one value and the result was used along with the remaining seven crack length measurements. Similarly, the final value of physical crack extension Δa_p was taken as the average of nine similar measurements Δa_{pi} ($i = 1-9$) between the original crack front and the end of stable crack growth.

3. Results and discussion

Fig. 1 shows the J-R curves at 4 K for the specimens precracked at 77 K. A quantitative measure of J_Q (candidate value of J_{IC}) is operationally defined as the point of intersection of the power-law regression line and a blunting line, $J = 2\sigma_y\Delta a$, drawn at a 0.2 mm offset; σ_y is the effective yield strength. The J_Q value of 38.5 kJ/m^2 at 6 T is lower than the J_Q value at 0 T (42.6 kJ/m^2). On the other hand, the J_Q value of 58.6 kJ/m^2 at 6 T is higher than the J_Q value at 0 T (45.9 kJ/m^2) for the specimen precracked at RT (not shown). Fig. 2 shows representative fractographic features of the fracture surfaces of the broken specimens under 6 T precracked at RT and 77 K. Some brittle facets, assumed to be intergranular, were observed in the samples precracked at 77 K. It was implied that the higher brittleness of the specimens precracked at 77 K associated with high ferrite content, relative to the specimens precracked at RT.

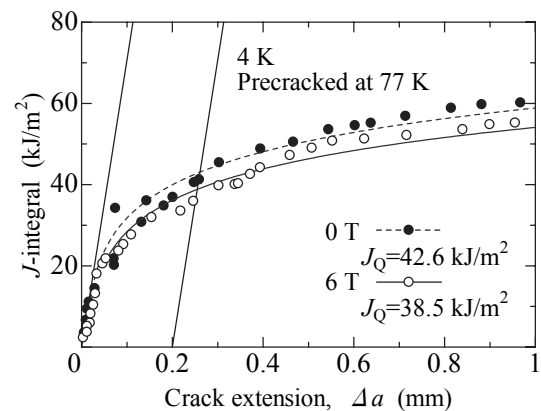


Fig. 1. J-R curves for SUS304 CT specimens precracked at 4K.

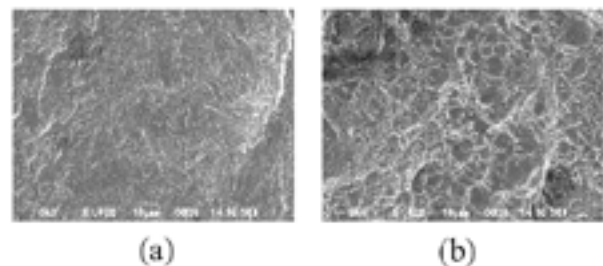


Fig. 2. Fractographs of broken specimens in 6 T precracked at (a) RT and (b) 77K.

Reference

1. Y.Shindo, et al.: Cryogenics, Vol. 44 (2004), p.789.
2. Y.Shindo, et al.: Fusion Eng. Des., Vol. 73 (2005), p.1.

超電導回転機用構造材料の候補材評価

Evaluation of considered structural material for superconducting machine

奥村 嘉賀男、山口 貢、細井 昭宏、小菅 永二、細井 和恵(超電導機構)横山 稔(川崎重工)
 OKUMURA Kagao, YAMAGUCHI Mitsugi, HOSOI Akihiro, KOSUGE Eiji, HOSOI Kazue(JSO) YOKOYAMA Minoru(KHI)

1. はじめに

超電導回転機用候補材料は、材料区分として磁性材と非磁性材、使用環境として常温域から瞬低音域におよぶ材料仕様が要求される。

特に、超電導回転子(ロータ)は、多重円筒構造であるために、構造材料に要求される材料特性も種々異なる。且つ、その材料は、製造性・加工性・経済性を重視した構造材料の選定及び開発が重要である。

従来から、超電導回転機用構造材料の候補材は、多々あげられてきたが、実際には米国材料規格 A286 (超合金鋼)材が採用されてきた。但し、A286 材は、経済性、製造性、加工性から高価格材料となるために、低価格材料でなければ同材での事業化は困難である。

現在、A286 の製造メーカーも殆ど存在しない。

本報告は A286 材に代わる候補材として、改良型ステンレス鋼 KHMN や高マンガン鋼 JKA1 の非磁性鋼等を掲げ、その材料評価を行った。また、磁性材候補材として耐錆性磁気シールド鋼 EFE-X を紹介する。

今回の発表は、NEDO 事業「先導研究」の一環として超電導回転機用構造材料の材料特性及び、検証実験を行い、材料評価を行った結果の報告である。

2 評価内容

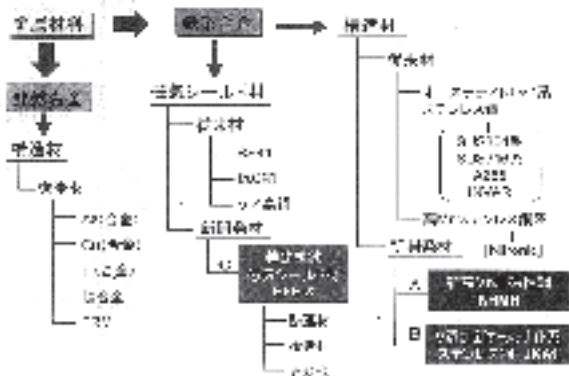
使用目的の船用超電導モーター回転子及び磁気シールド用極低温構造材料の具備すべき特性及び設計・製造の観点から、候補材料の評価内容としては以下の項目を対象とする。構造材料としての新開発材料(KHMN 及び JKA1)と従来材(SUS316LN、SUS316L、A286、Al合金(Al-Mg)、Cu 合金(黄銅)、Ti 合金(Ti-5Al-2.5Sn))を比較検討した。

- ①力学的特性(機械的性質)-強度、延性、靱性、疲労など
- ②物理的特性-熱伝導率、熱収縮(膨張)率、電磁特性など
- ③化学的性質-耐錆性、耐食性

その他として、以下の事項も一応考慮対象とする。

- ※ 材料の施工性に関わる加工性(塑性加工性、機械加工性)
- ※ 接合性(溶接、ガス圧接ならびに継手性能)
- ※ 経済性(材料コスト)
- ※ 回転子(軸)多重円筒の製作性

表1 物理・化学的性質及び使用特性に関する新材料・従来材の比較



3 結果及び考察

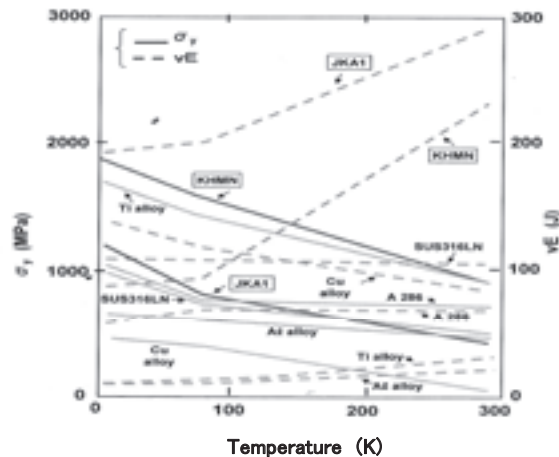
強度と靱性と温度依存の観点(機械的/力学的特性)からみると、所要用途特性にもよるが、強度・靱性の兼備性において、KHMNとJKA1が従来材よりかなりすぐれていることが判別された。即ち、新開発材のほうが4K~常温の全温度領域において、従来材よりも強度・靱性のバランスに富んでいるといえる。物理的性質、化学的性質、使用特性の観点からみると、所要用途特性にもよるが、相対比較をしてみると KHMN は低熱膨張、極低透磁率、温度と加工に対して耐応力腐食割れ性、硬度制御による良加工性、経済性など、また JKA1 は低透磁率、耐応力腐食割れ、耐鋭敏化脆化、供給性、経済性などの諸点で、特徴に乏しい従来材より好ましいといえそうである。

また磁気シールド材としてEFE-Xを従来材の低C鋼、ケイ素鋼の構造材と同様に機械的/力学的特性とその他の諸特性の観点から比較対照すると次のことがいえる。

強度特性からみると、焼鈍ままではEFE-Xは極低C、N材ゆえ従来材に劣るのは原理的にやむを得ないが、磁気特性を阻害することなく調質圧延によって強度化が計れるので、大いに優位性を主張できるとみてよいであろう。特にケイ素鋼は0.5mm 程度の薄板がすべてといつてよいので、熱延~冷延の製造が可能な EFE-X は強度・延性・靱性制御に加えて使用上の利便性が大きい。EFE-X の磁気シールド性にすぐれることは最大の利点であり、極低 C、N 材ゆえ耐食性、溶接性、加工性にもすぐれている。そして現在の精錬技術によれば EFE-X の製造は難事ではないゆえ、従来材に比べて價格的にも遜色はなく、ケイ素鋼に比べれば、明らかに経済性において有利としてよい。

以上の総括により、よく知られている諸従来材に加えて、本稿で概説した新開発材料 3 種は船用超電導モーター構造材並びに磁気シールド材の候補・選択肢として考慮対象になり得るのではないかと考える。

表2 新開発材(新高Mn非磁性鋼KHMN及びV添加新オーステナイト系ステンレス(JKA1)と従来材の降伏応 σ_y とシャルピー衝撃エネルギー vE の温度依存性比較



参考文献
 「超電導磁石用極低温構造材料の開発(野原、奥村、佐藤、野村);まてりあ(日本金属学会会報)、1994」

Sn-Ta 基合金を用いた Nb₃Sn 線材の組織と特性

Performance and Structure of Nb₃Sn Wire Prepared by Sn-Ta Based Alloys.

太刀川 恭治(東海大・工), 林 裕貴, 中田 光栄, 佐々木 弘樹, 山口 真弘(東海大・院); 竹内 孝夫(NIMS)
 K.Tachikawa, Y.Hayashi, K.Nakata, H.Sasaki, M.Yamaguchi (Faculty of Engr., Tokai Univ.). T.Takeuchi (NIMS)
 E-mail:tacsuper@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

1. はじめに

本研究では Sn-Ta 系合金を用いたジェリーロールロール(JR)法及びロッド法で作製した Nb₃Sn 線材の組織と特性について研究した。

2. 実験方法

Sn-Ta に対して少量の Ti を置換し、Cu を添加した粉末を二種類の異なる形状のルツボで熔融拡散し、Sn-Ta 系合金インゴットを作製した。円形のボタン状インゴットはプレスと平ロール圧延によってシート状に加工して、市販の Nb シートと Nb-3.3at%Ta 合金シートを組み合わせた JR 法にて線材化を行った。舟形ルツボで作製した棒状インゴットはプレス後切削加工により丸径に削り出し、JR 法と同組成のシートに挿入した複合体を溝ロールと引抜き加工によって対辺長 1.22mm の六角素線とした。これを 19 本束ねた複合体にバリアとして Nb シートをまいて Cu ジャケットに入れ、静水圧押し出しと引き抜き加工により 1.2mm φ まで線引きした。線材断面の組織は光学顕微鏡の他、EPMA と SEM を用いて観察、分析を行った。臨界電流 I_c は垂直磁界下で四端子法によって 1 μV/cm を基準に測定し、非銅部面積で除して臨界電流密度 J_c とした。

3. 実験結果と考察

Sn-Ta 系合金を用いた合金では Sn/Ta 原子比 4/1 に 3at%Ti を置換し、3wt%Cu を添加した組成が標準的であるが、JR 法線材の高磁界特性はシート組成にあまり敏感ではなく、4.2K, 22T で 120-150A/mm² の J_c がえられている。Fig.1 には上記の組成の JR 法線材の上部臨界磁界 B_{c2} 遷移を示したが、4.2K で 26.4T(off), 27.2T(on), 26.8T(mid) の値となった。

JR 法線材ではシート部に厚さ ~60 μm の Nb₃Sn 層が生成され、その Sn 濃度は 25at% で濃度勾配がみられない。一方ブロンズ法線材の Nb₃Sn の Sn 濃度はブロンズ側は 25at% であるが、Nb 芯側では減少して濃度勾配をもつことが報告されている。JR 法線材では Fig.2 に模式的に示すように、Nb が Sn-Ta シートに拡散して Sn-Ta-Nb の 3 元相が生成され、入れ替わりに Sn が Nb に拡散する相互拡散により Nb₃Sn 層が生成される。ブロンズ法では Nb がブロンズに拡散することなく、Sn が Nb に拡散する一方向拡散のため Sn の大きい濃度勾配を生ずると考えられる。Sn 濃度が化学量論比組成で勾配のないことが Sn-Ta 系 Nb₃Sn 線材で優れた高磁界特性の得られる第一の原因と考えられる。

次に Fig.3 にロッド法線材の熱処理前後の断面の光学顕微鏡組織を示した。加工後の線材では、六角素線のフィラメントに Nb₃Sn 層が生成されるが、層厚は 30 μm 程度で JR 法線材に比べると薄い。また、フィラメントのカップリングが見られるが、最外周の Nb₃Sn 層はバリア内に収まっている。EPMA 分析ではフィラメント内部に Sn-Ta-Nb の 3 元相の生成が認められた。

Fig.4 に 1.54mm φ 及び 1.94mm φ のロッド法線材の J_c-磁界特性を示した。1.2mm φ 線材の特性は未測定

である。750℃熱処理の方が 725℃熱処理より若干大きい J_c がえられ、4.2K, 22T で最高 ~120A/mm² の JR 法線材に近い J_c が得られた。線材断面の Nb₃Sn 層の面積比は JR 法よりやや小さい。ロッド法の研究は予備的段階であるが、JR 法より製法が容易であり、今後線材設計などの改良によって組成や特性の改善を図る予定である。終わりにロッド法線材の静水圧押し出しと線引き加工をしていただいた日立電線㈱に深甚な謝意を表します。

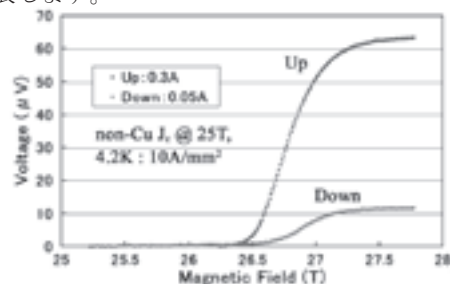


Fig.1 B_{c2} Transition of 4/1(Sn-Ta)-4Ti+3Cu Sheet JR Wire(H.T.:750℃×100h)

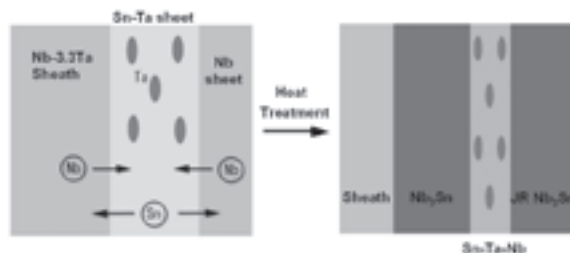
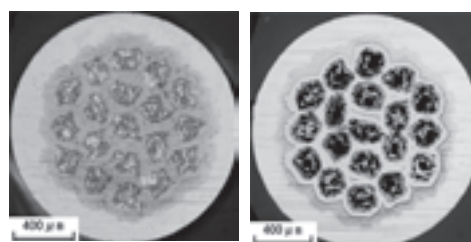


Fig.2 Schematic Diffusion Reaction in Sn-Ta Sheet JR Wire



As drawn Heat Treated
 Fig.3 Cross Section of 19 Filament Wire

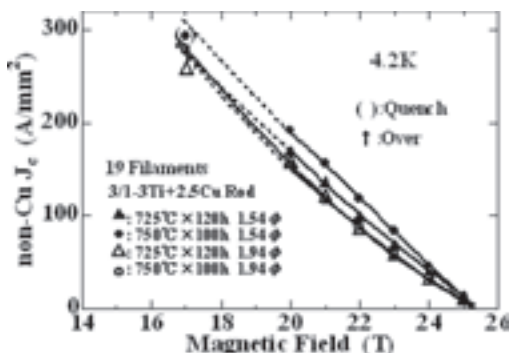


Fig.4 J_c-B Performance of Rod-Processed Wires

Sn-Ti-Cu/Nb ジェリーロール法 Nb₃Sn 線材の開発

Development of Jelly-Roll processed Nb₃Sn wires

大圃 一実, 木村 守男, 清藤 雅宏, 中川 和彦, 田中 和英 (日立電線)
 和田山 芳英, 鈴木 隆之, 高橋 雅也 (日立)
 太刀川 恭治 (東海大), 竹内 孝夫 (NIMS)

OHATA Katsumi, KIMURA Morio, SEUDO Masahiro, NAKAGAWA Kazuhiko, TANAKA Kazuhide (Hitachi Cable, Ltd.)
 WADAYAMA Yoshihide, SUZUKI Takayuki, TAKAHASHI Masaya (Hitachi, Ltd.)
 TACHIKAWA Kyoji (Tokai University), TAKEUCHI Takao (NIMS)
 E-mail: ohata.katsumi@hitachi-cable.co.jp

1. はじめに

ジェリーロール(JR)法 Nb₃Sn 線材は 20T 以上の高磁界中で高い臨界電流密度特性を示すことが報告されており[1]、従来のブロンズ法に代わる高磁界用 Nb₃Sn 線材の製法のひとつとして期待されている。

本研究ではさらに高 Jc 化を目指して、JR 層のシート厚みについて検討し、Nb₃Sn の生成と Jc 特性への影響について調べた。

2. 実験方法

通常の JR 線材構造として、(a)Nb 製コアの周りに、圧延により作製した厚さ 0.09mm の Sn 合金シート(Sn-2%Ti-5%Cu:大阪合金工業所製)と、厚さ 0.1mm の Nb 合金シート各 1 枚を重ね巻きした。また JR 層のシートを厚くした構造として、(b)Nb コアおよび(c)Sn 合金コアの周りに厚さ 0.6mm の Nb 合金層と厚さ 0.27mm の Sn 合金層を合計 4 層巻きつけて JR 層を形成した。いずれも JR 層の周りに拡散バリアとして Nb 合金シートを巻きつけ、Cu パイプに入れて複合材を作製した。

作製した試料を、φ 1mm に伸線後、700°C × 150hr で熱処理し、18~25T の磁場中で Jc 測定を行った。

Table 1 Specifications of the Jelly-Roll wires.

Item \ Sample	(a)	(b)	(c)
Core(φ 3mm)	Nb	Nb	Sn-2%Ti
Jelly-Roll layer	Material Sn-2%Ti-5%Cu / Nb-1%Ta		
Thickness(Sn)	0.09mm	0.27mm	
Thickness(Nb)	0.1mm	0.6mm	
No. of layer	18	4	
Barrier	Nb-5%Ta (0.1mm × 7)		
Sheath	OFC (φ 12.7 / φ 11.5)		
Volume fraction	Sn 0.25	Nb 0.19	0.25
	Nb 0.58	0.63	0.57
	Cu 0.17	0.18	0.18

3. 結果および考察

Figure 1 に熱処理後の断面を示す。(a)の通常構造線材はバリア部およびコア部に厚く Nb₃Sn が生成しているが、JR 層の部分には不連続的に分散した Nb₃Sn が生成している。一方、線材(b)と(c)は層状構造が保持され、これに沿って Nb₃Sn が連続的に生成して、分散した Nb₃Sn は見られなかった。これは、線材(a)では JR 層の厚みが薄いため線材の加工時に層状構造が崩れやすいのに対し、JR 層が厚い(b)と(c)では加工後も層状構造が保たれたためと考えられる。

Figure 2 に non-Cu Jc の磁場依存性を示す。線材(a)と(b)の Jc は 20T で約 200A/mm²であり、線材(c)では約 270 A/mm²の高い Jc が得られた。(b)と(c)の Jc の違いは、Table 1 に示す Sn の体積分率の違いに概ね対応していることから、Sn の体積分率に応じて Nb₃Sn が生成しているものと考えられる。また、(a)は Sn の少ない(b)とほぼ同じ Jc であるが、これは(a)では不連続に分散した Nb₃Sn が通電特性に寄与していないためであろうと推定される。

以上のように、不連続な Nb₃Sn の生成を抑制し、Sn の複合化率を最適化することが、断面構成の面でジェリーロール線材の高 Jc 化に役立つことがわかり、今後諸条件の最適化を図る。

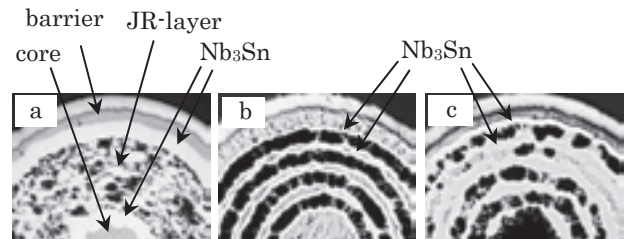


Fig.1 Cross-sectional views of heat-treated Jelly-Roll wires. (a)Nb/Sn(Nb-core), (b)6Nb/3Sn(Nb-core), and (c)6Nb/3Sn(Sn-core).

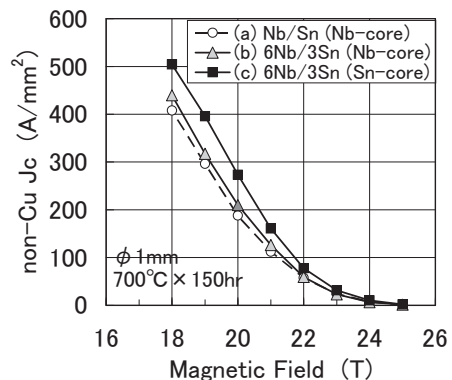


Fig.2 Jc-B characteristics of the Jelly-Roll wires.

参考文献

- 1) K.Tachikawa, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., **15** (2005) 3486.

Nb と Ag-Sn 合金の拡散により生成した Nb₃Sn 線材への Mg 添加効果

Effects of Mg Addition on Nb₃Sn Wire Fabricated through Diffusion Reaction between Nb and Ag-Sn Alloys

岩谷 雅義, 井上 廉(徳島大学); 竹内 孝夫, 木吉 司(物材機構)

IWATANI Masayoshi, INOUE Kiyoshi (The Univ. of Tokushima); TAKEUCHI Takao, KIYOSHI Tsukasa (NIMS)

E-mail: gangan@ee.tokushima-u.ac.jp

1. はじめに

今までの研究で、Ag-Sn 合金の拡散反応において、Ag は Cu のように Nb₃Sn の拡散生成を促進する効果は少ないが、Ag-Sn の拡散反応により生成した Nb₃Sn は特性的にブロンズ法に劣らない事が判明した。更に Mg を添加することで特性を改良できる可能性があることを見いだした[1]。今回は Nb と Ag-Sn-Mg 合金の複合体を 2 段階で詰め込み加工し 15000 芯とした線材と、Ag-Sn-Mg 中の Sn 比率を増加させた線材を作製し、Nb₃Sn 層の微細化と Ag-Sn 中の Sn 濃度の増加が超伝導特性にどのような効果を及ぼすかを検討した。

2. 実験方法

以前に作製した Ag-9at%Sn-2at%Mg、Ag-9at%Sn-4at%Mg 及び Ag-9at%Sn-6at%Mg の 180 芯線材を 60mm の長さになり、長さ 50mm、外形 17.5mm、内径 12mm の Nb パイプに詰め込み、溝ロールとカセットローラーダイスを使った加工で直径 0.88mm の 15000 芯線材を作製した。加工途中で、断面減少率による加工率が 20% に達するごとに真空中で 450°C×1h の中間焼鈍を行い、芯材が硬くなりすぎないようにした。また、あらたに Ag-11at%Sn-2at%Mg、Ag-11at%Sn-4at%Mg 及び Ag-11at%Sn-6at%Mg 合金を Ar 雰囲気下でタンマン溶解炉を使って溶解し、長さ 77mm、直径 13mm の円柱状試料とした。この Ag-11at%Sn-2at%Mg 棒、Ag-11at%Sn-4at%Mg 棒及び Ag-11at%Sn-6at%Mg 棒を、長さ 60mm、外径 20mm、内径 13mm の Nb パイプにそれぞれ挿入し、前述と同様の方法で溝ロールとカセットローラーダイスを使って直径 0.81mm の単芯線材を作製した。このようにして作製した Ag-9at%Sn-2at%Mg、Ag-9at%Sn-4at%Mg 及び Ag-9at%Sn-6at%Mg の 15000 芯線材と Ag-11at%Sn-2at%Mg、Ag-11at%Sn-4at%Mg 及び Ag-11at%Sn-6at%Mg の単芯線材を、それぞれ 50mm 長に切断し、真空中で 600°C~800°C の温度で熱処理をして Nb₃Sn を拡散生成させた。熱処理後、試料は Cu メッキをした後、電圧リードと電流リードをとりつけて I_c の測定を行った。

3. 結果と考察

以前作製した Mg を添加していなかった試料では、多芯線に加工をすることで T_c 特性が低下したものがあつたが、今回作製した Mg を添加した試料では Fig. 1 に示すように T_c 特性が低下しない。また、Sn 濃度を増加させた芯材については、まだ単芯線材段階であるので詳しいことは不明瞭であるが、9at%Sn を含む合金を使った 15000 芯線材は Fig. 2 に示すように 180 芯線材より更に I_c 特性が向上し、Ti 添加や Ta 添加をしていないブロンズ法によって作製された Nb₃Sn 線材と比較して見劣りしない特性を得ることができた。現在、Ag-11at%Sn-2at%Mg、Ag-11at%Sn-4at%Mg 及び Ag-11at%Sn-6at%Mg 単芯線を更に Nb パイプに詰め込み、180 芯線、15000 芯線とした線材を作製中である。これらの線材はさらなる超伝導特性の向上が期待できる。

参考文献

[1] M. Iwatani, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.33

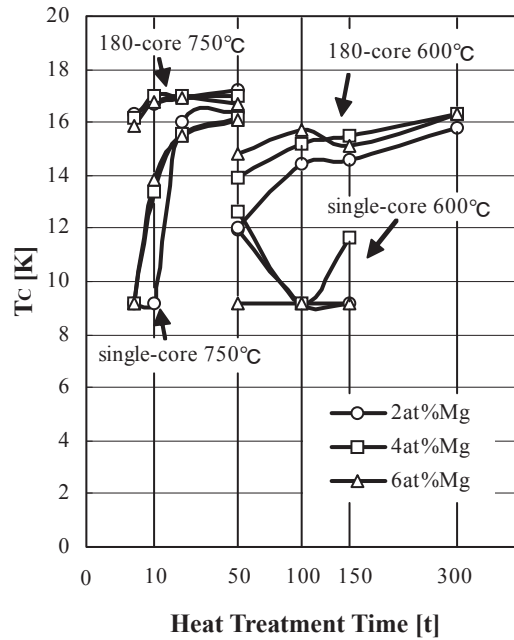


Fig. 1. T_c vs. heat treatment time curves for Ag-9at%Sn-2at%Mg/Nb, Ag-9at%Sn-4at%Mg/Nb, and Ag-9at%Sn-6at%Mg/Nb wires with single-core and 180-core, respectively. These wires were heat treated at 600°C and 750°C.

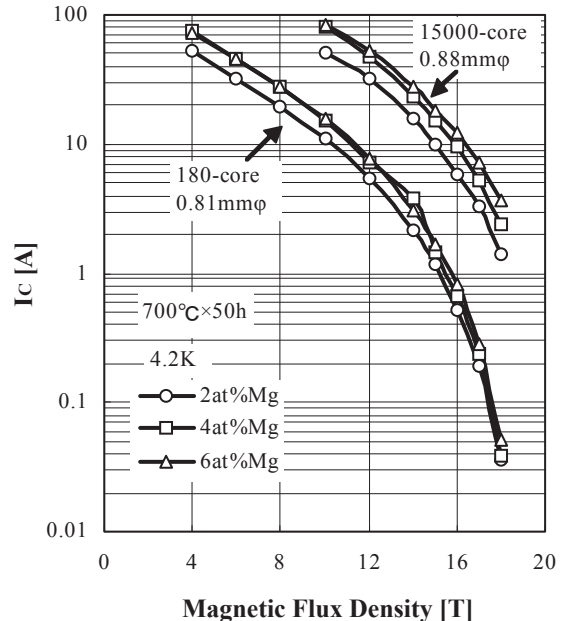


Fig. 2. I_c (4.2K) vs. magnetic flux density curves for Ag-9at%Sn-2at%Mg/Nb, Ag-9at%Sn-4at%Mg/Nb, and Ag-9at%Sn-6at%Mg/Nb wires with 180-core and 15000-core, respectively. These wires were heat treated at 700°C for 40 hr.

事前曲げ処理した Nb₃Sn 素線を用いた撚線の通電特性

Transport Characteristics of High-Strength Cable Using Pre-bent Nb₃Sn Strands

西島 元, 小黑 英俊, 淡路 智, 渡辺 和雄 (東北大学); 坪内 宏和 (古河電工); 花井 哲 (東芝)
 NISHIJIMA Gen, OGURO Hidetoshi, AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku University);
 TSUBOUCHI Hirokazu (Furukawa Electric); HANAI Satoshi (Toshiba Corporation)
 E-mail: gen@imr.edu

1. はじめに

我々はブロンズ法 Nb₃Sn 素線における事前曲げ効果 (pre-bending effect) の応用としてリアクト・アンド・ワインド法 (R&W 法) コイル [1] および撚線への適用 [2] に取り組んでいる。通常の Nb₃Sn 撚線は、未熟処理素線を撚り合わせた後に超伝導生成熱処理されるが、本研究では超伝導生成熱処理後の素線に事前曲げ処理を施した後に撚線加工する。これまでに線径 1 mm の素線を用いた 3 本撚線の試作を行い、適用性を示した [2]。

高強度 Nb₃Sn 素線は従来型 Nb₃Sn 素線に比べれば 2 倍程度の応力設計が可能であるが、それでも 300 MPa を超えるような応力設計は不可能である。そこで導体自体に強度を持たせることを目的として、Nb₃Sn 素線 3 本と SUS 素線 4 本からなる撚線を試作し、その磁場中通電特性を評価した。

2. 事前曲げ Nb₃Sn 撚線

素線には Cu-20%Nb により内部補強を施した CuNb/Nb₃Sn 素線 (線径 0.6 mm) を用いた。超伝導生成熱処理 (670 °C × 96 hrs) 後の素線に事前曲げ歪 ($\epsilon_{pb}=0.8\%$) を 10 個のプリーを用いて与えた後に、撚線機を用いて撚線加工した。素線間絶縁はされていない。製作した撚線は 3 本撚線 (triplet) と (3+4) 撚線である。後者は SUS 芯線の周りに Nb₃Sn 素線と SUS 素線を交互に配置した。Fig. 1 に撚線の構造を示す。撚りピッチは 40 mm である。比較のために内部補強の無い Cu/Nb₃Sn 素線を用いた撚線も製作した。

製作した撚線を直径 260 mm の巻枠に 3 ターン巻き付けてテストコイルを製作した。写真を Fig. 2 に示す。印加電磁力に対して導体の自由度を大きくしたことで、電極近傍への応力集中を避けるように工夫されている。

3. 磁場中通電特性

通電はヘリウム浸漬 (4.2 K), バックアップ磁場 9-11 T で行った。また通電方向は、電磁力が内向き (圧縮方向; 導体が巻枠に押し付けられて圧縮される方向) と電磁力が外向き (拡張方向; 導体が巻枠から離れ、導体にフープ力が作用する方向) の 2 通り行った。

Fig. 3 に圧縮方向通電時および拡張方向通電時の 3 本撚線と (3+4) 撚線の I_c (0.1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 定義) を示す。図には素線 I_c (1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 定義) から予想される I_c (=素線 $I_c \times 3$; 事前曲げ有りの場合と無しの場合) を合わせて示す。圧縮方向 (compressive stress condition) の場合、(3+4) 撚線 I_c は 3 本撚線 I_c に比べて 70% 程度の値である。これは SUS 素線の熱膨張係数が Nb₃Sn 素線に比べて大きく、Nb₃Sn 素線が圧縮歪を受けて I_c が低下しているためと考えられる。

図には拡張方向 (hoop stress condition) 通電時の I_c はプロットしていないが、いずれのコイルも I_c を定義するに十分な分流電圧を発生した後にクエンチした。ここでは最大通電電流としてのクエンチ電流 I_q に注目する。拡張方向通電時の I_q と予想される I_c との比較では、3 本撚線 I_q は事前曲げ処理していない素線 I_c (の 3 倍) よりも小さい

が、(3+4) 撚線 I_q は大きい。4 本の SUS 素線による補強効果と考えられるが、詳細についてはまだ解析中であり、当日報告する。

参考文献

- [1] G. Nishijima, et al., Supercond. Sci. Technol. 21 (2008) 054012.
 [2] G. Nishijima, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 17 (2007) 2595.

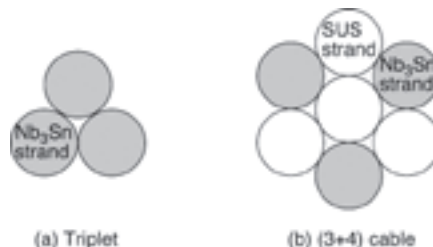


Fig. 1 Schematic cross section of triplet and (3+4) cable.

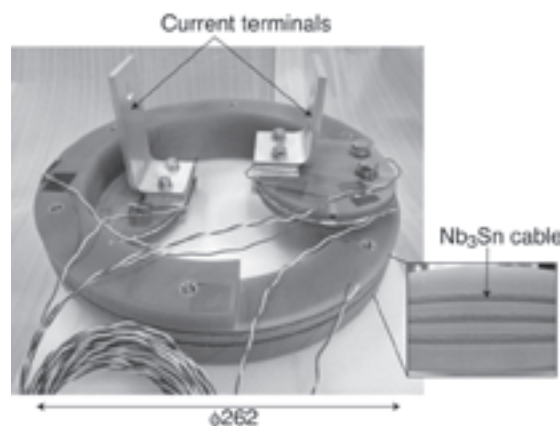


Fig. 2 Photograph of test coil.

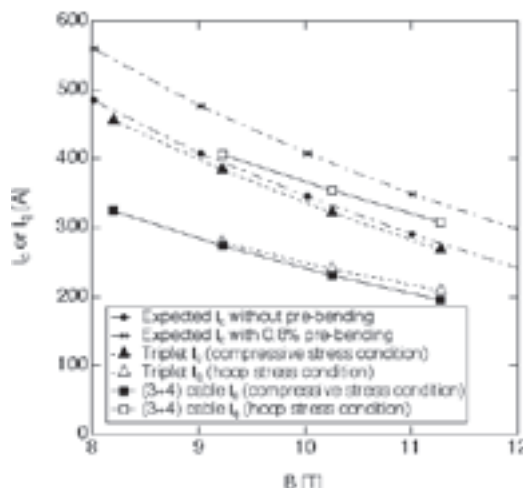


Fig. 3 Test coil I_c and I_q as a function of magnetic field.

リスタック Nb₃Al 線材における磁化特性 Magnetization in re-stack Nb₃Al conductor

伴野信哉, 二森茂樹, 竹内孝夫, 飯嶋安男, 菊池章弘 (物質・材料研究機構)
田中和英, 中川和彦, 田川浩平 (日立電線)
BANNO N, NIMORI S, TAKEUCHI T, IIJIMA Y, KIKUCHI A (NIMS)
TANAKA K, NAKAGAWA K, TAGAWA K (Hitachi Cable, Ltd.)
E-mail: banno.nobuya@nims.go.jp

1. はじめに

Nb (Al) 過飽和固溶体線材は優れた延性をもつことから、それらを Cu 安定化材とともにリスタックすることによって作製する新しい安定化 Nb₃Al 線材が考案されている [1]。この線材は従来材に比べてフィラメント径を一桁程度縮径可能であることから、次期加速器用マグネット等で問題とされる低磁界不安定性の抑制が期待される。本件では、リスタック Nb₃Al 線材において特徴的な磁化特性が観察されたので報告する。

2. 線材構成と実験方法

線材は、従来の急熱急冷法により作製された Nb (Al) 過飽和固溶体線材を Cu 管の中に複数本束ね、通常のダイスにより共引き伸線して作製される。このリスタック工程により従来材のフィラメント径が、Cu 管サイズおよびリスタック用線材の組込本数等に応じて縮径される。また今回マトリクスには Nb の代わりにすべて Ta を使用した。これにより Nb の超伝導性に起因する低磁界での磁氣的結合の抑制が期待できる。試作材 (ME490-RS) の諸元を比較材 (従来材) と共に Table 1 に示す。また断面図を Fig. 1 に示す。

磁化測定には SQUID 磁化測定装置を用い、±5T の範囲で 4.2K および 1.8K の温度で行った。試料の端部はカップリングを防ぐために精密研磨を施した。測定時の磁場方向は試料軸に対して垂直である。また磁化を算出するに当たっては、比較のため超伝導体積あたりの値とした。

Table 1. Specifications of developed Nb₃Al conductor

	ME490-RS	HE2432
Diameter (mm)	1.0	1.35
Filament No.	1512 (=84x18)	132
Filament dia. (μm)	13.6	89.3
Barrier	Ta	Nb
Barrier thickness (μm)	2.28	8
Outer sheath	Ta	Nb
Matrix/SC ratio (SC fraction %)	0.8 (28%)	0.8
Cu/non-Cu ratio (Cu fraction %)	0.988 (49%)	-

3. 結果と考察

Fig. 2 に 4.2K における各 Nb₃Al 試料の磁化ヒステリシス曲線を示す。標準試料の HE2432 の磁化はフィラメント径に依存して大きく、またバリアに Nb を使用しているために 0.5T 以下の低磁界ではフィラメントの磁氣的結合に伴って磁化が急激に増大し、フラックスジャンプが生じている。それに対し ME490-RS では、フラックスジャンプの抑制とともに、フィラメント径の縮径に伴って磁化の値が従来材の数分の一まで低減されることがわかった。

また Fig. 3 には 4.2K 付近での ME490-RS と Nb₃Sn (RRP high J_c design) 線材 [2] の全体積あたりの磁化特性を比較

した。ME490-RS 線材の磁化は RRP Nb₃Sn 線材と比べても非常に小さく、低磁界において非常に安定した特性を示していることがわかる。

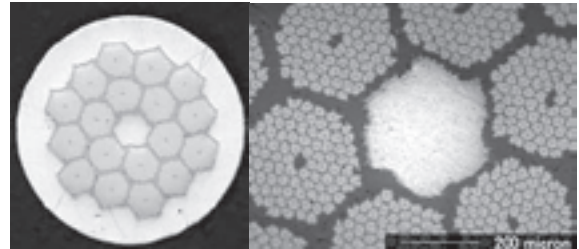


Fig. 1. Cross-section of sample (ME490-RS)

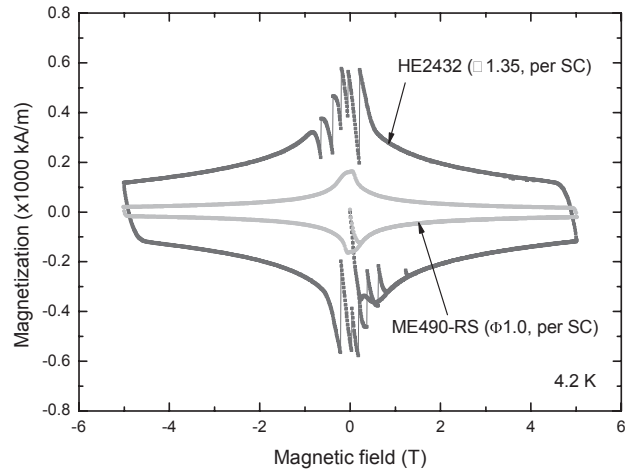


Fig. 2. Magnetization curve per SC volume of ME490-RS and HE2432 at 4.2 K

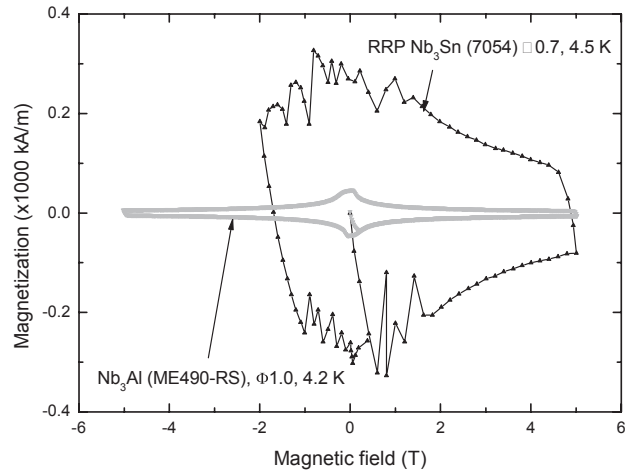


Fig. 3. Comparison of magnetization curve per total volume between re-stack Nb₃Al wire and RRP high J_c design Nb₃Sn wire [2]

[1] N. Banno, T. Takeuchi, et al.: SuST, **19**, p1057 (2006)
[2] A. K. Ghosh, L. D. Colly, et al.: IEEE Appl. Supercond., **15** (2005)
なお本研究の一部は、文部科学省原子力試験研究の一環として行われた。

RHQT-Nb₃Al 線材開発における線径柔軟性について(2) — RHQT-Nb₃Al 線材の大電流容量化 — Wire-diameter variety of RHQT Nb₃Al conductor (2)

中川 和彦, 田中和英, 田川 浩平(日立電線);
竹内 孝夫, 北口 仁, 伴野 信哉, 飯嶋 安男, 菊池 章弘(NIMS)
NAKAGAWA Kazuhiko, TANAKA Kazuhide, TAGAWA Kohei (Hitachi Cable);
TAKEUCHI Takao, KITAGUCHI Hitoshi, BANNO Nobuya, IJIMA Yasuo, KIKUCHI Akihiro(NIMS)
E-mail: nakagawa.kazuhiko@hitachi-cable.co.jp

1. はじめに

高磁界特性に優れた急熱急冷・変態(RHQT)法 Nb₃Al 線材を NMR 用内層マグネットに適用するには、組合される中層や外層マグネットと一括励磁できることが望ましい。

これまでに km レベルの長尺化線材製作や^{*1}、一括励磁に必要な各種サイズの線材製作が可能であることを確認してきた^{*2}。

本報告では、これまでの最大線径線材における急熱急冷処理条件の適正化と、それを用いた安定化銅クラッド加工について試作した結果について報告する。

2. 実験方法

RHQT-Nb₃Al 線材は急熱急冷(RHQ)処理時の制約から、線径 ϕ 1.35mm が最大径だったが、RHQ 処理時の張力等の条件設定により線径 ϕ 1.52mm まで処理できる可能性が確認できた^{*2}。

しかし、RHQ 処理時の発生電圧の変動が大きく、安定した処理ができないため、通線条件を含めた RHQ 処理条件の見直しを行った。

具体的には、冷却用ガリウム(Ga)バス中の通線リールを位置調整して通線経路の適正化を実施し、RHQ 処理時の発生電圧変動を低下できる条件を選定した。Table 1 には試作線材の仕様を示す。

RHQ 処理条件を最適化した線材は、クラッド法により安定化銅を複合化し、1.9x0.9mm 平角線材を作製した。

3. 実験結果と考察

線径 ϕ 1.52mm 線材を用いた RHQ 処理は可能だったが、処理中の発生電圧変動が従来の線径時に比べて 3 倍以上大きな値だった。

線材特性の均一化を目的に、RHQ 処理装置における線材の通線経路の適正化を行った結果、発生電圧変動を約 1/3 以下の従来レベルに低減でき、 ϕ 1.52mm 線材においても安定した処理を実現できることが分かった。Figure 1 には当初の設定における RQ 処理時の発生電圧変化を示し、Figure 2 には改善後の同じく発生電圧変化を示す。

このようにして製作した Nb/(Nb-Al)過飽和固溶体線材を用いて、安定化銅複合化のためのクラッド加工を実施し、従来サイズと同様に 1.9x0.9mm サイズの平角線材を作製した。

本研究の一部は文部科学省科学技術振興費委託研究(新方式 NMR 分析技術の開発)、15 文科振第 332 号、16 文科振第 556 号、17 文科振第 212 号、18 文科振第 457 号及び 19 文科振第 207 号の一環として行われた。

4. 参考文献

- 1 K.Tagawa, et al.: IEEE Trans. on ASC, vol.16, No.2(2006), p.1168
- 2 中川和彦他, 2007 年度秋季低温工学・超電導学会, 1C-a12

Table 1. Specification of the wire

Wire diameter (mm)	1.52
Nb matrix ratio	0.80
Filament diameter (μ m)	100.5
Number of filament	132

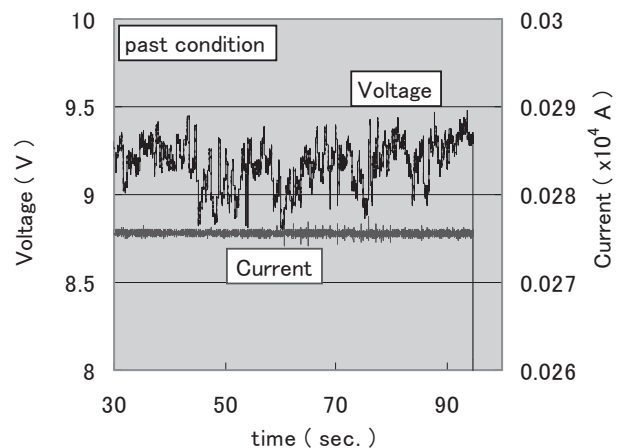


Figure 1 Monitored heating current and voltage of RHQ treatment before the apparatus modification.

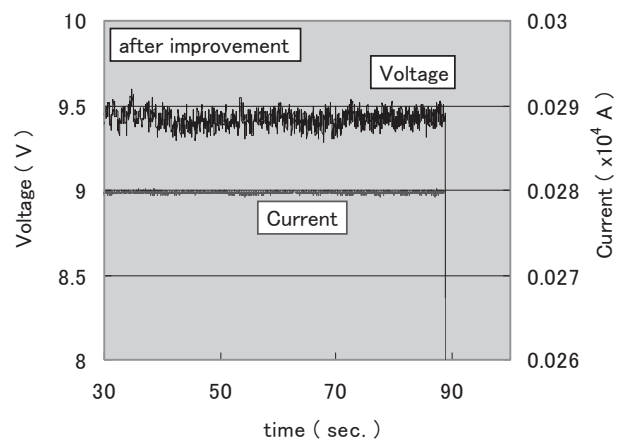


Figure 2 Monitored heating current and voltage of RHQ treatment after the apparatus modification.

伝導冷却型超伝導マグネットの冷却構造最適化研究

Cooling structure optimization study of a conduction-cooled superconducting magnet

三戸 利行, 力石 浩孝 (NIFS); 川越 明史, 住吉 文夫 (鹿児島大)

MITO Toshiyuki, CHIKARAIISHI Hiroataka (NIFS); KAWAGOE Akifumi, SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima University)

e-mail: mito@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

伝導冷却方式の超伝導マグネットを設計する場合、使用温度の相違による材料の熱物性の変化に注意を払う必要がある。瞬低対策 SMES 用として開発した伝導冷却型の低温超伝導 (LTS) パルスコイルでは、マグネット構成材料の熱拡散率 (熱伝導度/比熱) が極低温で著しく増大する効果に応用し、金属のみでなくエポキシや GFRP 等の絶縁物を用いてもコイル構造を最適化することにより、秒単位でコイル全体に熱が拡散する高排熱特性の達成が可能であることを実証した。本発表では、1MJ 級伝導冷却 LTS パルスコイルの冷却特性の温度依存性及びコイル内部発熱時の排熱特性について、冷却励磁実験の結果に基づいた考察を行うと共に、高温超伝導コイルへの適用も想定した伝導冷却型超伝導マグネットの冷却構造最適化について検討した。

2. 1MJ 級伝導冷却型 LTS パルスコイルの構成

経済性及び機械特性に優れる反面、臨界温度の低い NbTi 超伝導体を用い、パルス運転時の交流損失による温度上昇を電流分岐開始温度以下にするため、低交流損失と高安定性を同時に満たす超伝導体を開発した。開発した導体は、導体断面に対する変動磁場の印可方向で交流損失の異方性を持つため、コイル内の磁場方向に合わせて導体を捻りながら巻線する新しいコイル製法を実施した。また、コイル巻線内の高排熱特性を実現するため、巻線の層間にリッツ線とダイニーマ FRP のスペーサを挟んで 14 層の巻線を行った。巻線の内径 0.6 m、外径 0.8 m、長さ 1.1 m で、コイル断面内のリッツ線の総断面積は 6,120 mm² となっている。

3. 冷却特性の温度依存性

コイルは巻線内に挟み込んだリッツ線の端部を GM 冷凍機のコールドヘッドに直接熱接触させることにより、伝導で冷却される。4K—GM 冷凍機 3 台を用い、冷凍能力 4.5 W @ 4 K 及び 240 W @ 65 K に対し、冷却重量 1,100 kg、設計熱負荷 2.3 W @ 4 K 及び 186 W @ 65 K となっている。Fig.1 に冷却曲線を示す。約 2 週間で 300 K から 4 K の冷却に成功した。この間、コイル内には殆ど温度差がついておらず、本伝導冷却コイルの優れた排熱特性を示している。一方、GM 冷凍機のコールドヘッドの温度とコイル温度との間には一定の温度差が生じている。Fig.2 にコイル温度に対するコールドヘッドとの温度差の依存性を示す。10K 以下の極低温では比熱の減少に伴う熱拡散率の増大効果により、コイルの熱が速やかに冷凍機へ伝わり温度差がつかなくなるが判る。

4. コイル内部発熱時の排熱特性

励磁実験では定格電流 1kA の通電から時定数 4 秒で電源を遮断した際のコイルの温度上昇を測定した。Fig.3 にコイル電流と温度上昇の関係を示す。遮断時に発生する交流損失 447 J により、コイル内の温度は最大 3.9 K から 4.4 K まで 0.5 K 上昇するが、コイルは安定であり、瞬低 SMES として必要な 1 秒間にコイル蓄積エネルギーの半分を放出する運転モードに余裕を持って対応できることを実証した。

5. 冷却構造最適化の検討

固体熱伝導に頼るだけでは熱輸送特性には限界があり、より高熱負荷で高性能なマグネットとするためには、新たな技術の導入が必要である。また、熱拡散率の増大効果は 10K 以下の極低温でしか有効ではないため、20K 以上の運転温度を想定している高温超伝導マグネットでは同様の効果は期待

できない。高熱伝導率と低比熱を両立した高熱拡散率のコイル構造を実現することにより、超伝導マグネットの冷却構造を最適化することが可能となる。具体的な設計例として、コイル巻線内に冷媒ガスを強制循環する冷却パネルを挟み込む方式と、ヒートパイプを用いた冷却方式について検討している。

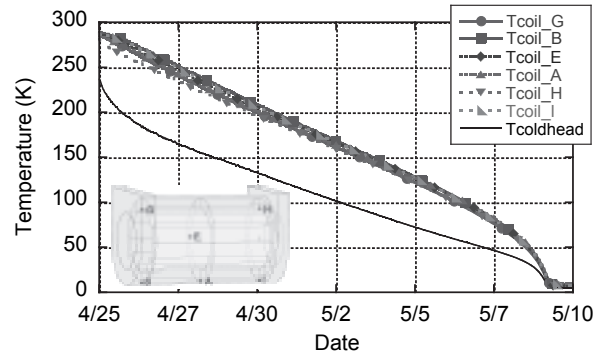


Fig. 1. Cooling curves of 1MJ conduction-cooled LTS coil.

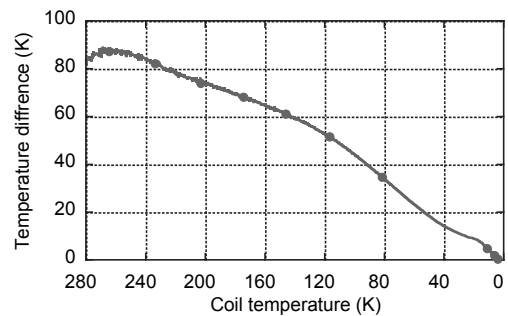


Fig. 2. Temperature difference between coil and cold head.

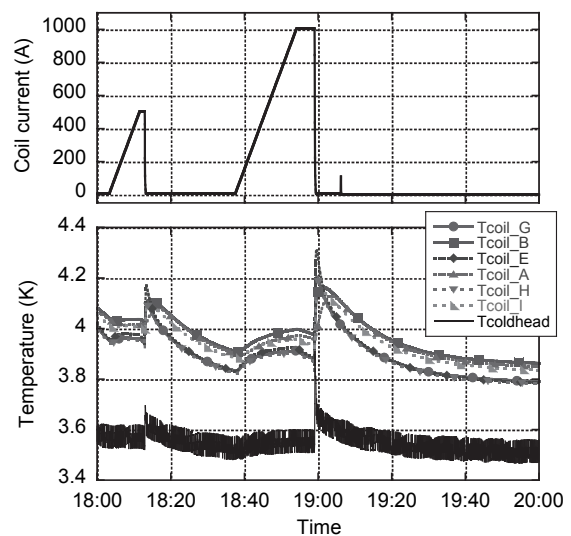


Fig. 3. Coil current and temperatures during shut-down test.

参考文献

- 三戸利行他, 「1MJ, 1秒補償瞬低対策 SMES の開発研究 (2)—1MJ コイルの冷却励磁試験—」, 2007 年春季低温工学超電導学会講演概要集, P.111.

イットリウム系超電導含浸コイルの伝導冷却通電特性 Test Results of Conduction-cooled Impregnated YBCO Coil

宮崎 寛史, 田崎 賢司, 小野 通隆, 丸川 宏太郎, 花井 哲, 石井 祐介(東芝)

MIYAZAKI Hiroshi, TASAKI Kenji, ONO Michitaka, MARUKAWA Kotaro, HANAI Satoshi, ISHII Yusuke (TOSHIBA)

E-mail: hiroshi17.miyazaki@toshiba.co.jp

1. はじめに

伝導冷却方式で必要となるイットリウム系超電導線材を使用した含浸コイルの製作技術の確立を目指して、低電界領域まで劣化のない含浸コイルの開発に取り組んでいる。今回、内径 50 mm, 外径 96 mm のシングルパンケーキコイル 2 個で構成された含浸コイルを試作し、液体窒素中および伝導冷却にて通電試験を実施した。

2. コイル試作および通電試験(液体窒素中)

使用したイットリウム系超電導線材および試作した含浸型シングルパンケーキコイル 2 個(コイル#A およびコイル#B)の諸元を Table.1 および Table.2 に示す。コイルの健全性を確認するため液体窒素中で通電試験を実施した。Fig.1 には 10^{-9} V/cm までの通電試験結果と短尺線材($I_c = 100$ A@77 K, 0 T)の 77 K での臨界電流特性から計算したコイル電界値を併せて示す。 $1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-6}$ V/cm の電界領域で定義したコイル n 値はともに 30 以上であり、 10^{-9} V/cm の低電界領域まで良好な超電導特性を有している。また、短尺線材の特性から計算した結果とほぼ一致していることから、線材の特性を劣化させることなく、良好な超電導特性を有する含浸コイルを製作することができた。

3. 伝導冷却試験

試作した 2 個のシングルパンケーキコイル間に厚さ 0.25 mm のアルミ板をはさんで積層・接着し、2 層のパンケーキコイルを製作した。アルミ板の先端を GM 冷凍機の 2 段冷却ステージに接続し、2 層のパンケーキコイルを真空中で熱伝導のみで冷却した。2 段冷却ステージに取り付けたヒータにより、コイル温度を 25 K~70 K まで変化させて 2 層のパンケーキコイルの通電試験を実施した。なお、評価コイルの温度は、上下の各パンケーキコイルに取り付けた抵抗型温度計で測定し、電圧は各シングルパンケーキコイルの両端電圧を測定した。また、2 層のパンケーキコイルのボア中心にはホール素子を設置し、コイル中心磁場を測定した。

コイル温度 25 K での通電試験結果を Fig.2 に示す。通電中のコイル温度を 25 K に固定した状態でコイル平均電界 5×10^{-7} V/cm までは熱暴走することなく安定して通電することができた。コイル n 値はコイル#A およびコイル#B ともに 30 以上であり、低電界領域まで良好な超電導特性を有していることを確認した。なお 327 A 通電時には中心磁場 1.0 T を達成した。また、30 K~70 K の各温度においても同様の通電試験結果が得られており、全温度領域において低電界領域まで劣化のない高品質な含浸コイルを実現した。

4. まとめ

イットリウム系超電導線材を使用して含浸コイルを試作し、伝導冷却方式で低電界領域まで劣化のない含浸コイルの製作に成功した。今後は、コイルの大型化、高磁場化に向けた開発を進める予定である。

Table.1 Specifications of YBCO Tape

Width	4.4 mm
Thickness	0.2 mm
Length / coil	20 m
Min. I_c @77 K, 0 T (Coil#A)	89 A
Min. I_c @77 K, 0 T (Coil#B)	92 A

Table.2 Specifications of YBCO single-pancake coils

Coil	#A	#B
Inner diameter	50.0 mm	50.0 mm
Outer diameter	95.8~95.9 mm	95.6~96.2 mm
Turns	86.5	86.5

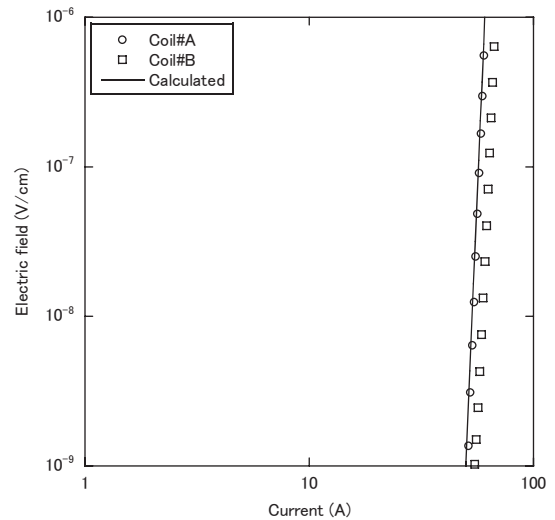


Fig.1 E-I characteristics of single-pancake coils at 77 K

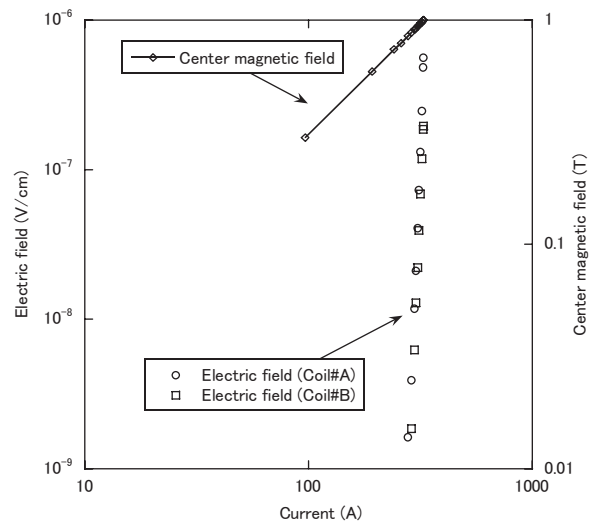


Fig.2 Current dependences of electric field and center magnetic field in a conduction-cooled test at 25 K

ポインティングベクトル法による高温超伝導コイル内の局所的な状態の推定

The estimation of local conditions in HTS coils by Poynting's method.

徳田 将展、上之原 伸一、川越 明史、住吉 文夫 (鹿児島大・工)

TOKUDA Masanori, KAMINOHARA Shinichi, KAWAGOE Akifumi, SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima University)

bt203051@ms.kagoshima-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、超伝導コイルの異常検出方法として、ポインティングベクトル法を用いた新しい測定方法を提案している。この測定方法の特長は、コイルに直接電圧リードを取り付けないために放電事故を誘発しないこと、電氣的測定法のために感度の高い測定が可能であることである。

これまでに、コイル周辺のポインティングベクトルの変化を測定することによって、Bi-2223 テープ線材で巻線したソレノイドコイルに発生した異常を非接触で検出できることを実証した。[1, 2]今回は、サンプルコイル内の局所的な状態を推定するために、異常が発生しているサンプルコイル周辺の局所電界と磁界を数値解析により求め、その結果と実験結果とを比較した。

2. 測定方法と測定装置

本測定方法は、超伝導コイルを円筒状の金属部材で囲み、この金属部材を通過するポインティングベクトルを測定する。円筒表面の磁界と電界を測定し、それらの外積を一周期積分してポインティングベクトルを求める。磁界と電界の測定には、それぞれ磁界検出用のピックアップコイルと電界検出用のポテンシャルリードを用いる。電界は、ポテンシャルリード電圧から誘導成分をハード的にキャンセルし、抵抗性電圧を測定して求める。ポインティングベクトルは、Fig.1 に示すように二方向の成分を測定する(P1, P2)。P1とP2の分布から、コイル内の局所的な異常を検出することができる。

測定装置の概略図を Fig.1 に示す。サンプルコイルとして用いた超伝導コイルは、高強度銀シース Bi-2223 多芯テープ線材を 3 層×15 ターン巻線したソレノイドコイルである。内径 70mm、高さ 78.5mm である。このコイルを囲むように、直径 130mm、高さ 200mm の円筒ステンレスシートが配置されている。ステンレスシートにポテンシャルリードをハンダ付けしており、ピックアップコイルとセットで取り付けている。

3. 実験方法

サンプルコイルに、200Hz、10Arms の交流電流を通电した状態のまま、デュワに注入している液体窒素を減らしていき、コイルの上部から強制的に常伝導領域にした。そして、その時の各ポテンシャルリード電圧の時間的変化を観測することにより、超伝導コイルの異常検出を行った。サンプルコイルの状態をモニタするため、サンプルコイル両端電圧の観測も同時に行った。この際サンプル電流が異常に伴って変化しないように定電流モードで通电を行った。今回測定を行ったのは、コイル上部に設置した V3 の位置(Fig.1(b))である。実験結果を Fig.2 に示す。横軸は経過時間、縦軸は、ポインティングベクトルである。サンプルコイルの両端電圧の変化に伴ってポインティングベクトルが変化していることが分かる。

4. 数値解析の方法

定電流モードでサンプルコイルに通电しているので、実験中磁界変化はなかった。したがって、電界の変化を数値解析により求めたことによりポインティングベクトルを計算することができる。本理論解析では、ポテンシャルリードが観測しているのは、超伝導コイルの損失性の磁化電流による磁場と考える。そのため正常時は、磁化電流がコイル全体に存在するとした。

異常発生時は、温度上昇に伴って磁化電流を増加させた後、完全に常伝導に移した時に磁化電流を 0 とした。数値解析の結果を Fig.3 に示す。電圧が一度上がってから下がるという同じ変化をしており、実験結果と半定量的に一致していることがわかる。実験値と計算値の絶対値の誤差は、コイルの I_c が劣化していたことなど、サンプルコイル内に局所的なダメージが加わっていたためと考えている。

5. まとめ

サンプルコイル内の局所的な状態を推定するために、異常が発生しているサンプルコイル周辺の局所電界と磁界を数値解析により求めその結果と実験結果とを比較した。その結果実験結果と解析結果は半定量的に一致した。今後は各ターンの温度の測定などを行い、コイル内の詳細な状況を解析に反映する。

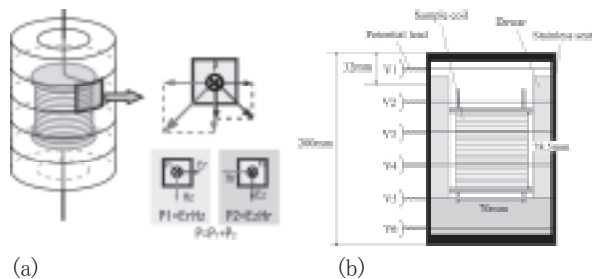


Fig.1 Measuring system of local conditions in HTS coil.

(a) Schematic diagram, (b) Experimental set up

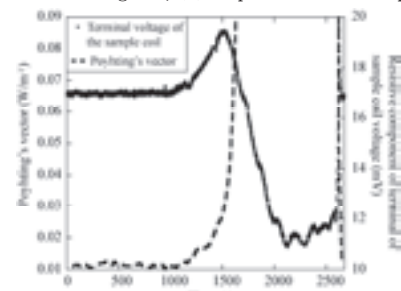


Fig.2 Measured voltages on the sample coil and local Poynting's vector.

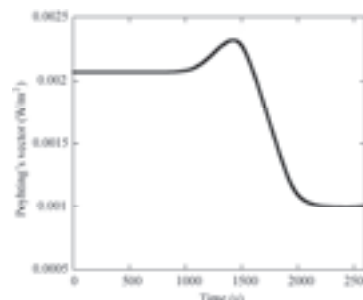


Fig.3 The results of the calculation.

参考文献

- [1] 徳田将展 他、第76回2007年度春季低温工学・超伝導学会講演概要集、p. 207
- [2] 徳田将展 他、第77回2007年度秋季低温工学・超伝導学会講演概要集、p. 53

熱電素子を用いた高温超電導マグネットの 励磁時間短縮に関する研究

The study on Exciting-time reduction of HTS Magnet Excited by Thermoelectric Element

山田 晃裕, 小山 尚人, 小柳 圭, 戸坂 泰造, 岡村 哲至(東京工業大学); 栗山 透(東芝)

YAMADA Akihiro, OYAMA Naoto, KOYANAGI Kei, TOSAKA Taizo, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech);

KURIYAMA Toru(TOSHIBA)

1. まえがき

これまでの研究で、熱電素子を用いることで1 [T]級高温超電導マグネットの励磁ができることを実験により確認した。しかし、熱電素子の起電力が数 mV であるため1 [T]まで励磁するのに7時間程かかってしまう。そこで、励磁時間を短縮するために、マグネットを励磁する際は外部電源を用い、励磁し終わったら外部電源を切り離し、熱電素子による定常通電を行なうシステムを提案する。

2. 実験装置

Fig.1 に実験装置を示す。Bi2223 線を用いた高温超電導コイルと熱電素子は極低温冷凍機によって冷却される。熱電素子内に温度差をつけて起電力を得るために、素子上部にヒーターが貼ってある。

Fig. 2 に本システムの電気回路図を示す。熱電素子へのヒーター入力を始めると同時に外部電源から電流を供給し、マグネットの中心磁場が1 [T] (120[A]) になった時に外部電源からの供給電流を徐々に下げた。

3. 実験結果

本実験で計測された励磁中の、外部電源から供給された電流、コイル電流、熱電素子に流れた電流の時間変化を Fig.3 に示す。最初は外部電源から 3[A/min]の増加割合で供給された電流は、コイルのインダクタンスのために熱電素子の起電力に逆らって大半が熱電素子側に流れた。本実験で用いた外部電源の電流容量が最大許容値(150A)となったところで、外部電源の供給電流を一定とした。この過程でコイルに流れる電流が大きくなり、熱電素子に流れる電流は減少した。コイル中心磁場が1 [T]となったところで、外部電源供給電流を減少させた。インダクタンスのためにコイル電流は保たれ、最終的にコイル電流の全量が熱電素子から供給された。以上の経過をたどり、1[T]を励磁するために、熱電素子のみで励磁を行なった場合には約7時間かかっていたものが、外部電源を併用することにより約4時間に短縮された。

謝辞

本研究の一部は科研費(18360101)の助成を受けたものである。

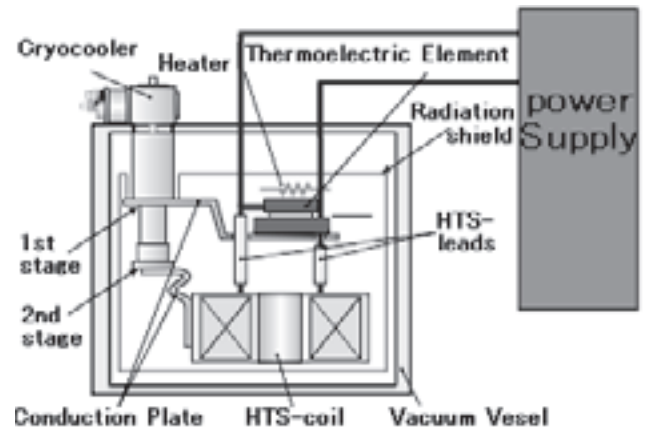


図1 実験装置模式図

Fig.1 Schematic view of experimental apparatus

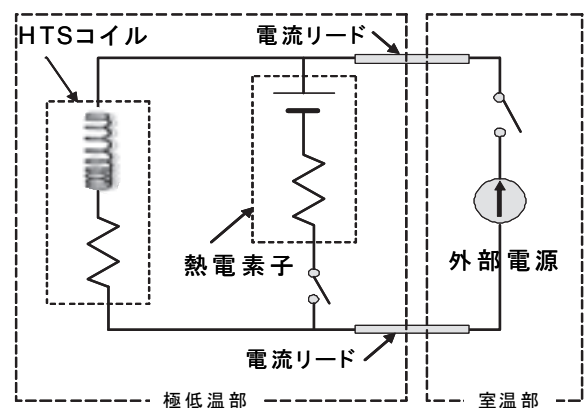


図2 システムの電気回路

Fig.2 Electric circuit of the system

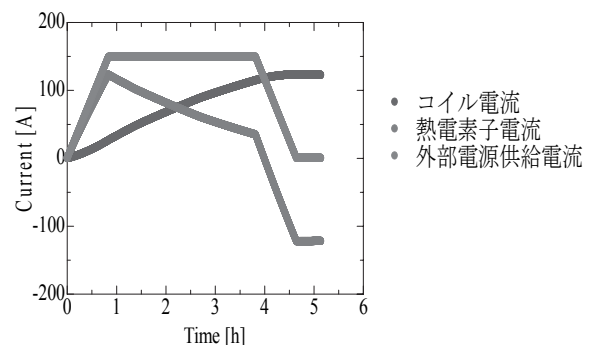


図3 励磁中に各部へ流れる電流の時間変化
Fig.3. Time traces of current flowing each parts

長尺 GdBCO 線材の臨界電流特性から見た高磁界マグネットの可能性

Potential of High-Field Magnet Based on Critical Current Characteristics in Long GdBCO Coated Conductor

東川 甲平, 木須 隆暢, 井上 昌睦 (九大); 淡路 智, 渡辺 和雄 (東北大); 福島 弘之, 山田 穰, 塩原 融 (SRL)

HIGASHIKAWA Kohei, KISS Takanobu, INOUE Masayoshi (Kyushu Univ); AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ);

FUKUSHIMA Hiroyuki, YAMADA Yutaka, SHIOHARA Yuh (SRL)

E-mail: kohei@superees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに GdBCO 線材に関しては、特に高 I_c の長尺線開発に成功しており、また磁界中での特性が YBCO 線材に比較してもさらに優れることが知られている。そこで本研究では、そのような長尺 GdBCO 線材の臨界電流特性を詳細に評価した上で、同線材の能力が特に生かされると期待される高磁界マグネットの可能性について検討した。

2. 線材の電流輸送特性 検討に用いた GdBCO 線材は、リール式長尺プロセスで作製され、線幅 10 mm, $I_c = 350$ A (77 K 自己磁界下) を有する。当該線材の電流密度-電界 (J - E) 特性を、四端子法により広範な温度 (4-83 K)・外部磁界 (0-27 T)・磁界印加角度 (任意) で評価し、さらにパーコレーション遷移モデルに基づく解析を行うことによって、 J - E 特性を温度・磁界・磁界印加角度の関数として定式化している。

3. コイルの運転条件 運転温度に関しては、高磁界発生を目的として、まず 4.2 K で検討している。また、通電電流に関しては、コイル内の臨界電流 (電界基準: $1 \mu\text{V}/\text{cm}$) 分布の最小値まで通電できると仮定する。ただし、同時に発熱も評価している。

4. コイルの構成・形状 Fig 1 に示すように、コイルは複数のダブルパンケーキコイルを積層して構成することを想定している。この時、1 ターン当たりに必要な領域は、線材厚み方向に 0.20 mm (線材厚: 0.12 mm + 絶縁層: 0.08 mm), 線材幅方向に 12 mm (線材幅: 10 mm + 絶縁層等: 2 mm) となる。コイル構成・形状にはもちろん最適化の余地もあるが、今後の最適化の有効性を示す意味においても、まず次の限られた条件で検討を進める。一つ目は、巻線部の内径 (d_i) を 26 mm としている。最優先事項を高磁界実現に設定する場合には、内径は小さい方が良く、コイル化の実績^[1]を考慮してこの値を設定している。二つ目は、コイル巻線部の断面形状を厚さ方向 (t): 高さ方向 (h) = 1:2 としている。巻線がコイル中心部から遠くならにようにこの比を採用している。以上の条件の下、使用線材長あるいはコイル体格に対して、どの程度の磁界発生が可能かを検討した。

5. 結果・考察 使用線材長 (l) に対してコイルの最大発生磁界 (B_{max}) をプロットしたものを Fig 2 に示す。また、それぞれの使用線材長に対応するコイルの外径 (d_o)・高さ (h) も同図に示している。同図からわかるように、本 GdBCO 線材を用いれば、少ない線材長で極めてコンパクトな高磁界コイルを実現できる可能性がある。例えば、75 m の線材長で外径 74 mm, 高さ 48 mm の小型コイルを作製するだけで 10 T 超の磁界を発生させることも可能となる (点 A)。また、さらに多くの線材を用いることができれば、コイルの発生可能磁界は順調に増加していく。例えば、100 μm 厚の Hastelloy 基板換算で 1 GPa (線材換算で 800 MPa 程度) のフープ応力 (σ) を許容すれば、40 T 超の磁界発生も期待できる (点 B)。なお、この時のコイル巻線部断面内の磁界分布・臨界電流分布・フープ応力分布を Fig. 3 に示している。

さて、今後の線材開発へのフィードバックのため、線材の I_c が異なる場合も Fig. 2 に検討している。同図から、線材の I_c によらず発生可能磁界がフープ応力の制約によってほぼ同等の値に制限されることがわかる。これは、高 I_c の線材では大電流通電により確かに電磁力が増大する一方、コンパクト化の影響で曲げ

半径も小さくて済み、いわゆる BJR で定義されるフープ応力が発生磁界によってほぼ変化しないためである。すなわち、ここで重要なことは、線材の高 I_c 化が純粹にコイルのコンパクト化に寄与するという点である。さらに、このコンパクト化がコイルの蓄積エネルギー低減に貢献することもわかっている。

謝辞 本研究に用いた GdBCO 線材は、NEDO の委託事業「超電導応用基盤技術研究開発」の一環で作製されたものである。また、線材特性の評価は、上記事業ならびに科学研究費補助金 (18360153) による助成を得て行われたものである。さらに、数値解析コードは、科学研究費補助金 (特別研究員奨励費) による助成を得て開発したものである。

参考文献

[1] H. Fukushima et al.: Abstracts of CSJ Conference, vol. 77 (2007) p. 204.

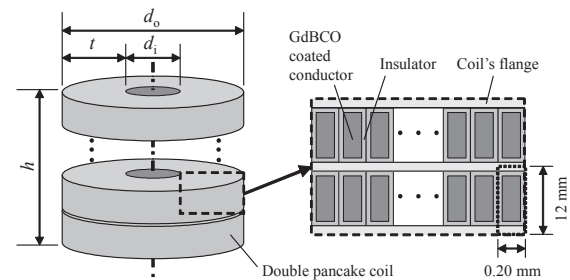


Fig. 1. Schematic diagram of GdBCO coil.

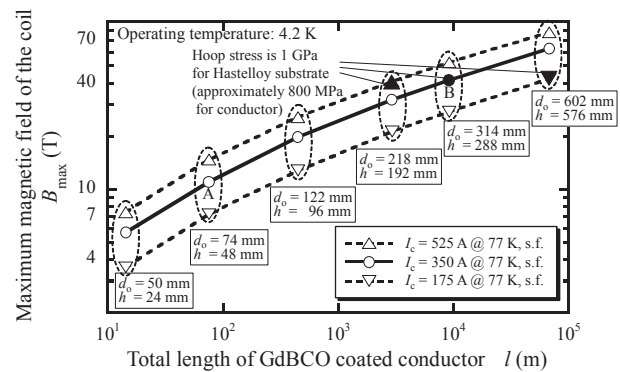


Fig. 2. Maximum magnetic field of the coil estimated for different conductor's length or coil's size. The field is estimated also for conductors with different critical current.

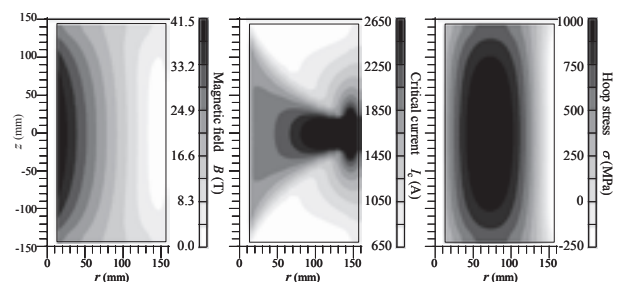


Fig. 3. Distributions of magnetic field, critical current and hoop stress in the GdBCO coil at point B in Fig. 2.

コンジット型 BSCCO 2223 ケーブルの機械的バットジョイントの基礎研究

Fundamental Study on Mechanical Butt Joint of Conduit-type BSCCO 2223 Cable

伊藤 悟, 加藤 喬之, 橋爪 秀利(東北大)

ITO Satoshi, KATO Takayuki, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku University)

E-mail: satoshi.ito@qse.tohoku.ac.jp

1. はじめに

核融合炉の製造コスト、メンテナンスコストの削減のためにマグネットを分割し着脱可能とする分割型高温超伝導マグネットが提案されている。Fig.1 に分割型高温超伝導マグネットの概念図を示す。マグネット材料としては、比較的高温で使用でき、材料の比熱を大きくすることができる高温超伝導体を採用している。これまで、分割型高温超伝導マグネットの基礎研究として、10枚積層 BSCCO 2223 ケーブルによる着脱可能な機械的バットジョイントの研究が進められてきた[1]。

BSCCO 2223 ケーブルの座屈や接合面形状の変化による接合性能の低下を抑制するために、昨年度から銅のコンジットの中に BSCCO 2223 テープを積層したコンジット型 BSCCO 2223 ケーブルの機械的バットジョイントの試験を進めてきた[2]。しかしながら、コンジット材と超伝導テープの熱膨張率の違いにより、冷却時には接合面に隙間が生じ、通電ができなくなってしまうため、接合面に(1)銀メッキ処理を行う(2)銀箔を挿入する(3)インジウム箔を挿入することにより、その隙間を埋めた状態で接合試験を行うこととした。本発表では、その試験結果を示し、各種接合面処理の有効性について報告する。

2. 実験体系

Fig. 2 に実験に使用したコンジット型 BSCCO 2223 ケーブルの概念図を示す。このケーブルは、銅のコンジット中に BSCCO 2223 テープを10枚積層し、はんだで含浸して固定したものである。接合面はケーブルの長手方向に対し、45°の角度を持って傾いており、粒径 3 μ m のアルミナによる研磨処理がなされている。銀メッキの厚さは 5 μ m、15 μ m、25 μ m、銀箔の厚さは 10 μ m、30 μ m、50 μ m、インジウム箔の厚さは 50 μ m とした。接合は、ケーブルの垂直方向から SUS304 製のロッドで接合部を押さえつけることで行い、ロッドによる接合応力(圧縮応力)と接合抵抗の関係を評価した。

3. 結果と考察

Fig. 3 に接合面に電解メッキ法で銀メッキ処理を行ったケーブルの場合の応力-抵抗特性を示す。メッキ厚が 15 μ m の場合に接合抵抗は最も小さくなり、その接合抵抗は 0.4 μ Ω となった。最適なメッキ厚が存在する理由は、メッキが薄い場合、接合面におけるせん断によってメッキがはがれてしまうこと、メッキが厚い場合、電解メッキ処理時間が長くなり、ケーブルの臨界電流密度の低下を引き起こすことであると考えられる。銀箔を接合面に挿入した場合は、銀メッキ処理を行った場合に比べ、接合抵抗が大きくなった。これは、接合面をメッキ処理した場合、機械的接合の界面が 1 つであるのに対し、銀箔挿入の場合、それが 2 つになるからであると考えられる。Fig. 4 に銀メッキ処理、銀箔挿入、インジウム箔挿入の 3 つの場合で、最小抵抗を与えた条件での応力-抵抗特性の比較を示す。図より接合面にインジウム箔を挿入した場合、接合応力が小さい場合でも、接合抵抗が小さく抑えられていることが確認できる。これは、インジウムが銀に比べて軟らかく、接合面における接触抵抗を低減しやすいためであると考えられる。

以上より、各種接合面処理の有効性を確認することができた。今後は、バットジョイントのみだけでなく、ラップジョイントの導入も検討し、電磁力や熱ひずみによる接合面形状変化や

接合面のずれを防止するための接合部最適化を行っていく予定である。

参考文献

1. S. Ito, et al.: Fusion Engineering and Design, Vol. 81 (2006) p.2527
2. T. Kato, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.166



Fig.1 Schematic View of Remountable HTS Magnet

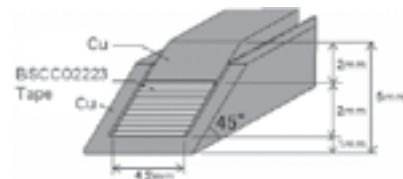


Fig.2 Conduit-type BSCCO 2223 Cable

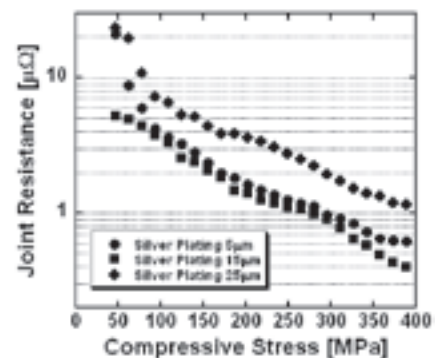


Fig.3 Stress-Resistance Characteristics in Silver-Plating

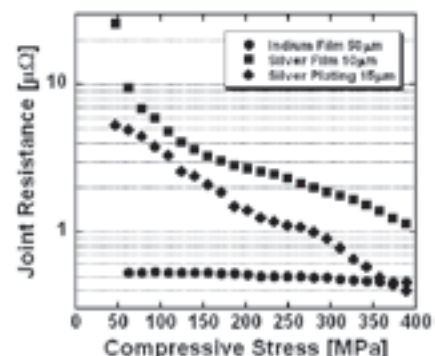


Fig.4 Comparison of Stress-Resistance Characteristics

急熱急冷・変態法 Nb₃Al 素線の軸方向歪特性と波状変形特性

Examinations on axial-strain and wave-shaped deformation characteristics of transformed Nb₃Al strand

名原 啓博, 布谷 嘉彦, 松井 邦浩, 辺見 努, 小泉 徳潔, 磯野 高明, 宇野 康弘, 奥井 良夫, 押切 雅幸, 妹尾 和威, 高橋 良和 (原子力機構); 菊池章弘, 伴野信哉, 竹内 孝夫 (NIMS)

NABARA Yoshihiro, NUNOYA Yoshihiko, MATSUI Kunihiro, HEMMI Tsutomu, KOIZUMI Norikiyo, ISONO Takaaki,

UNO Yasuhiro, OKUI Yoshio, OSHIKIRI Masayuki, SEO Kazutaka, TAKAHASHI Yoshikazu (JAEA);

KIKUCHI Akihiro, BANNO Nobuyuki, TAKEUCHI Takao (NIMS)

E-mail: nabara.yoshihiro@jaea.go.jp

1. はじめに

ITER 計画の中で Nb₃Sn 素線により製作したモデルコイルやインサートコイルでは、素線に加わる電磁力によって導体性能が低下した。これは、撓られた素線に電磁力が加わると、素線が波状に曲げ変形を受けることが原因と考えられている。一方、jelly roll 法による Nb₃Al 素線を用いて製作したインサートコイルでは、電磁力による導体性能の低下はほとんど見られなかった。これは、Nb₃Sn に比べて Nb₃Al は歪に対する臨界電流 I_c の低下が小さいことに起因するものと考えられる。ただ、ITER の次の発電実証炉への適用を考えると、この Nb₃Al 素線は 16T での I_c が不十分であった。一方、急熱急冷・変態法 Nb₃Al 素線が NIMS により開発され、16T でも高い I_c を持つことから、発電実証炉への有力な候補の1つとして考えられている。本研究では、NIMS により最近製作された素線(直径 0.7mm, 銅比 1.0)の I_c(B,T,ε)特性と波状変形特性を調べた。

2. 軸方向歪特性

C 形状をした治具に素線を設置して軸方向歪を加える装置を用い [1], 13T~15T, 4.2K~9K, 軸方向歪 -1.1%~0.2% における臨界電流密度 j_c(B,T,ε) 特性を測定した。15T での各温度、歪における j_c を Fig.1 に示す。どの温度においても、Nb₃Sn 素線と比較して歪による j_c の低下は小さい。また、j_c(15T, 4.2K, 0%) は約 900A/mm² に達し、j_c(12T, 4.2K, 0%) は 1500A/mm² 程度になると推定される。ITER 用に開発されたブロンズ法 Nb₃Sn 素線の j_c(12T, 4.2K, 0%) は 1000A/mm² 程度なので、軸方向歪特性、臨界電流密度ともに優れている。

3. 波状変形特性

波形状をした 2 つの治具間に素線を挟んで負荷を加える装置を用い [2], 15T, 6K~9K における波状変形特性を測定した。Fig.2 に 15T, 6K での負荷に対する規格化 I_c を示す。図には比較のため、Nb₃Al インサートコイルで使用した素線と、ITER 用に開発されたブロンズ法 Nb₃Sn 素線、CS インサートコイルで使用したブロンズ法 Nb₃Sn 素線のデータも併せて示す。この図から、急熱急冷・変態法 Nb₃Al 素線は、負荷 3.5kN/m 以下において Nb₃Sn 素線に比べて I_c の低下がかなり小さいことがわかる。しかし、3.5kN/m を超えると I_c が急激に低下してほぼゼロになった。その後、負荷をゼロにして再度 I_c を計測してもほぼゼロだったので、超伝導フィラメントが破断したものと考えられる。この急激な I_c の劣化現象は他の素線では観測されたことがなく、その発生原因を以下のように考察した。

まず、フィラメントが破断した領域の長さを推定する。安定化銅の RRR は 242 だったので、その 15T, 6K での電気抵抗率は $7.2 \times 10^{-10} \Omega\text{m}$ と推定される。I_c がほぼゼロになったときの電圧-電流特性から常伝導領域の電気抵抗は $0.22 \mu\Omega$ とわかり、その長さは 0.06 mm と推定される。長さが非常に短いのでフィラメントにクラックが生じたと考えられ、その原因として Nb マトリクスが挙げられる。Nb₃Al インサートコイルの素線は銅をマトリクスとし、ブロンズ法の Nb₃Sn 素線はブロンズをマトリクスとする。銅とブロンズは 4K での伸びが 45% 程度である。一方、

本急熱急冷・変態法 Nb₃Al 素線は Nb をマトリクスとし、伸びは 2% 程度しかない。波状変形では素線断面内で $\epsilon < 0$ の箇所もあれば $\epsilon > 0$ の箇所もある。簡単な梁モデルとして見積ると、Nb₃Al 部直径 0.5mm, 変位 60 μm とすれば最大曲歪は 1.44% で、測定治具から受ける熱ひずみを -0.35% とすると、歪は約 1% となる。まず $\epsilon > 0$ の箇所 Nb マトリクスが脆性破壊することによって剛性が低下し、さらに変形が進むことでマトリクスのみならず超伝導フィラメントも破断して行ってクラックとなり、今回のような I_c の急激な低下に至ったのではないかと考えられる。

4. まとめ

急熱急冷・変態法 Nb₃Al 素線の j_c(B,T,ε) 特性と波状変形特性を調べた。軸方向歪 -1.1%~0.2% に対する j_c の低下は Nb₃Sn 素線に比べて小さかった。しかし、波状変形負荷を 3.5kN/m 以上加えると I_c が急激に劣化してほぼゼロになった。これに関して、素線内部のマイクロな調査により原因を解明すると共に、サンプル数を増やし再現性の確認を行う必要がある。

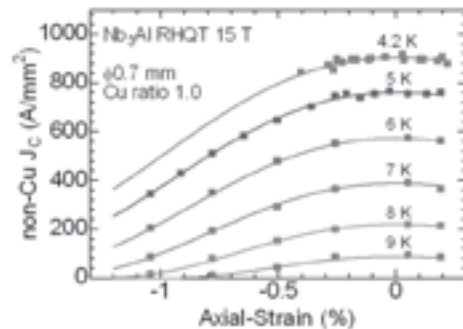


Fig.1 Non-Cu j_c against axial-strain.

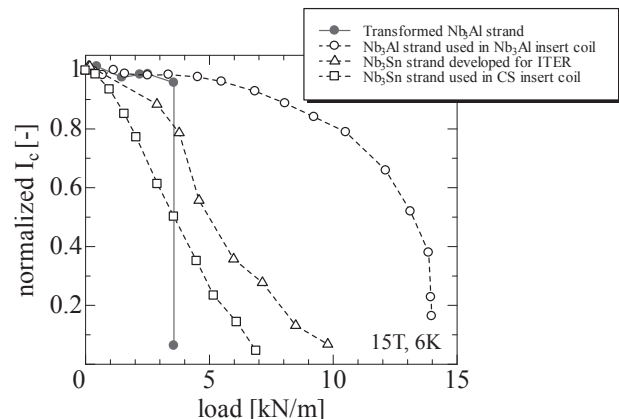


Fig.2 Normalized I_c against wave-shaped deformation load.

参考文献

1. Y. Nunoya, et al.: "Characterization of ITER Nb₃Sn strands under strain-applied conditions," MT20 (2007)
2. Y. Nabara, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.99

一端に平板発熱体を設けた2つの狭路付きダクトにおける 超流動ヘリウムの三次元熱伝達特性数値解析

3-D Numerical Analysis of Heat Transfer from a Flat Plate in a Duct with Two Contractions filled with He II

吉川 浩太郎, 白井 康之, 濱 勝彦, 塩津 正博(京大)

YOSHIKAWA Kotaro, SHIRAI Yasuyuki, HAMA Katsuhiko, SHIOTSU Masahiro (Kyoto Univ.)

E-mail: Yoshikawa@pe.energy.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

熱伝達特性に優れた He II は一定量以上の熱伝達に際して三次元的な渦を発生し、それが熱伝達に悪影響を及ぼすことが分かっている。そのため複雑な冷却パスを持つ He II 冷却型超電導マグネットの設計には、He II の三次元熱伝達特性の理解が求められ、数値解析のためには解析コードの開発が必要となる。

そこで筆者等は二流体モデルに基づく三次元解析コード SUPER-3D^①を開発・改良し数値解析と等条件での実験を行うことにより解析コードの信頼性を検討した。本研究では、二箇所の狭路(コントラクション)をもつ長方形ダクトの片側に設けた平板発熱体表面における定常臨界熱流束を解析した。コントラクションの開口面積・液槽の温度をさまざまに変えて解析し、それらが臨界熱流束に与える影響を検討した。コントラクションを複数設けることにより、He II の流れが三次元的に複雑になるため、乱流が臨界熱流束に与える影響をより詳しく調べることができる。

2. 解析モデル

解析モデルには Fig. 1 に示す全長 100mm の片側(図の右端)開放長方形ダクト(ダクト断面 32×10mm)を使用し、他端(図の左端)に平板発熱体を設けた。中心軸からの対称性より、ダクトを 4 分の 1 等分した部分について数値解析を行った。発熱体から 33mm、66mm の地点に厚さ 4mm のコントラクションを二つ設け、その開口面積を Table.1 に示す 4 通りに設定して解析を行った。超流動ヘリウムの液槽温度は 1.8K、1.9K、2.0K、2.1K とした。

3. 解析方法

大気圧下 101.3hPa の He II を対象とし、計算には二流体モデルに基づく三次元熱伝達特性解析コード SUPER-3D を用いた。

数値解析では上述の基礎方程式を有限差分法により陽的に解いた。微小空間刻みは xyz 方向すべて 0.5mm の等間隔スタガード格子で、時間刻みは 2.0×10^{-6} s とした。平板発熱体から入力する熱流束は、はじめ臨界熱流束よりも小さな熱流束を与え、発熱体表面のエントロピーの変化量が十分小さくなれば系は定常状態であるとみなし入力する熱流束を上昇させることとした。また、発熱体表面に接している He II の温度の最大値がラムダ温度に達したときの熱流束を臨界熱流束とした。

4. 解析結果

Fig. 3 に数値解析結果の一例として、(1)の開口面積を持つダクトにおける臨界熱流束到達時の常流動成分のストリームラインを示す。He II は 2 つのコントラクションにより三次元的に複雑な渦を形成していることがわかった。

Fig. 4 に(1)、(4)のダクトにおける臨界熱流束の、数値解析結果と実験結果との比較を示す。液温を低くしたり、開口面積を大きくすると臨界熱流束は大きくなる。誤差は最大で 13.7%であり、解析コードは十分に安定であるということが分かった。

参考文献

1. D. Doi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76, 1D-a06 (2007)

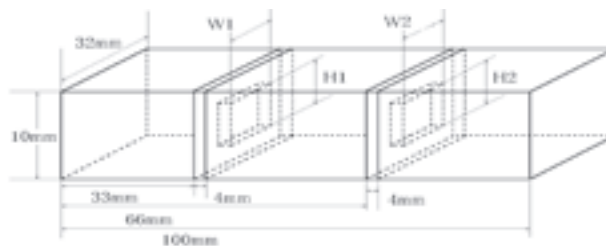


Fig.1 Schematic of the Duct with a Flat Plate Heater and Two Contractions.

Table.1 Width and Height of the each Contraction.

	(1)	(2)	(3)	(4)
W1, H1	21, 7	21, 7	16, 5	16, 5
W2, H2	21, 7	16, 5	21, 7	16, 5

(mm)

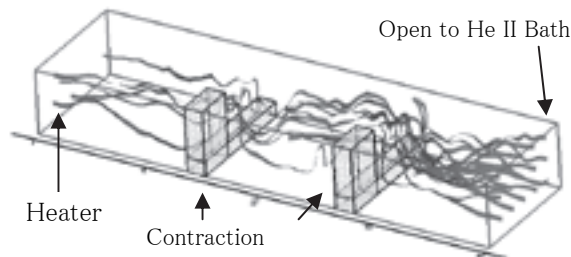


Fig.2. Example of Simulation Result. (The Stream Line of Super Fluid in Case(1) at 2.0K)

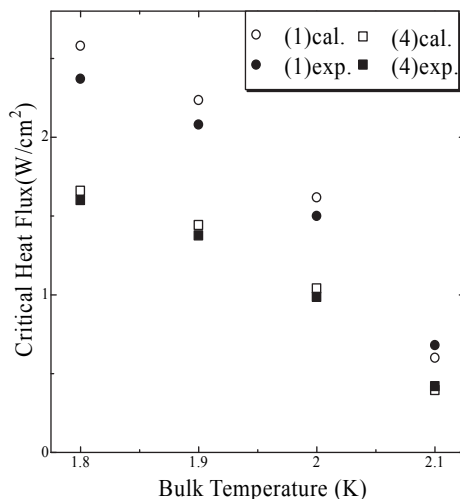


Fig.3 Comparison of Experimental and Calculated Data of Critical Heat Flux in case(1) and (4).

超臨界ヘリウムにおける水平平板間自然対流の数値シミュレーション

Numerical simulation of natural convection between horizontal parallel plates in supercritical helium

岡村 崇弘 (KEK)

OKAMURA Takahiro

High Energy Accelerator Research Organization, Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

E-mail:takahiro.okamura@kek.jp

1. 緒言

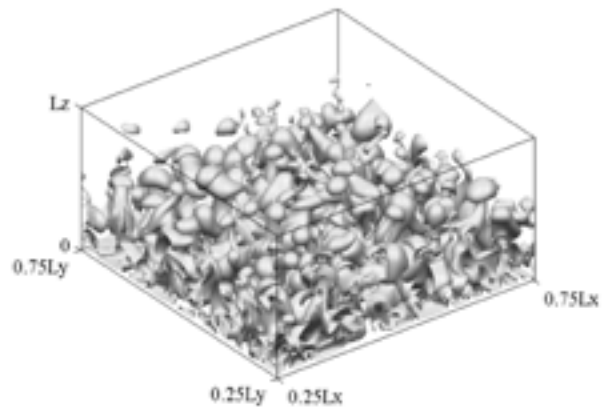
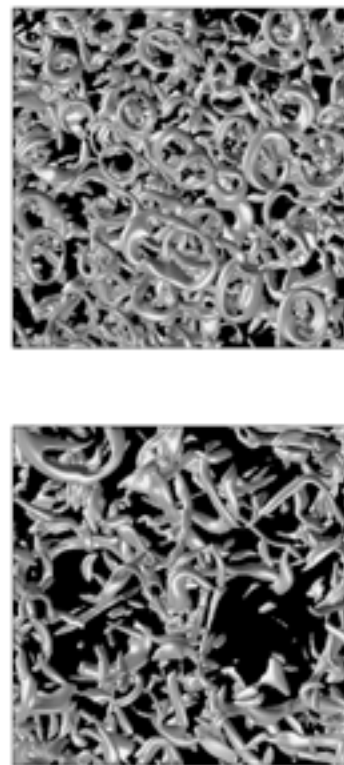
超臨界ヘリウム (SHe) が近年超伝導電磁石等の冷媒として用いられている。これに伴い SHe の熱・流体力学的な特性の把握が重要な課題となっている。一般に臨界点近傍流体は臨界異常に起因した非常に複雑な場を形成することが理論などからも明らかにされてきている。実際に数値実験や可視化実験等を行い超臨界流体の挙動を観測した例もあるが、これらの多くは流れ場を 2 次元的に捉えたものであるため、渦構造等の 3 次元構造や層流から乱流への遷移過程等の動力学に関しては十分に解明されていない。そこで、まず自然対流場に注目し、2 枚の水平平板下側を定常発熱させたときの流れ場の時間発展を、系の初期状態を変えて数値シミュレーションを実施する。本報では、解析により予測される 2 次元及 3 次元流れ場の構造に関して報告する。

2. 計算モデル

解析系は 2 次元水平流路 $\Omega_{2D} := [0, L_x] \times [0, L_z]$ 及び 3 次元水平流路 $\Omega_{3D} := [0, L_x] \times [0, L_y] \times [0, L_z]$ の下側を加熱する体系とし、鉛直上向きを z 座標としている。解析は固体・流体の連成問題として扱わず、発熱体に関しては時刻 $t=0$ sec で流路下側には流体初期温度よりも ΔT 高い温度を与え、流路上側壁は断熱条件若しくは流体の初期温度を維持する系を仮定し、連続式、運動量式、エネルギー式¹⁾及び熱的狀態式を用いて計算を行う。計算条件を Table1 に示す。

3. 計算結果

3 次元解析結果の一例を示す。 $T_0=5.25$ K, $p_0=229$ kPa, $\nabla T(x, y, L_z, t) \cdot e_z=0$, $L_z=3$ mm, $\Gamma=4$, $Ra \approx 5.76 \times 10^7$ なる系の流れ場の挙動を以下に記す。加熱初期段階で発熱面近傍に密度差による不安定波が生成され始めそれが徐々に成長して対流による熱輸送が開始される (Fig.1)。そのときの一例として $t=2.0$ sec 時の 3D 温度場を示したものが Fig.1 である。不安定波は時間発展すると発熱面近傍で z 方向に伸びた層状構造となる。鉛直上向きから見た場合この連結された層断面は多角形構造をしているが、各辺が波のように発熱体面上を動いていき、他の同様に動いてきたものと衝突・合体することでより大きな多角形構造となることが解析で得られた。 Fig.2 に鉛直上方から見た $t=2.4$ sec, 3.6 sec 時の渦形状を示す。不安定波の成長過程において流れ場は主に多数のトーラス状の渦輪により構成される (Fig.2 上)。渦輪が壁面に近づくと従い渦輪径が大きくなり、渦輪は崩壊しループ状でない渦管 (以下便宜上管状渦と表現) が多数占めるようになる (Fig.2 下)。つまりある時間で渦輪 - 管状渦遷移なるものが起きていることが伺える。この渦構造の遷移過程は Ra が増大するに従い顕著に現れるが、 Ra が小さいときは明確には出現しない結果が得られた。この渦輪の崩壊に関しては渦輪自身の不安定性に起因した崩壊という

Fig.1 Instantaneous temperature field at $t=2.0$ secFig.2 Instantaneous vortex structures at $t=2.4$ sec and 3.6 sec

より、そのような状態になる前に周りの多数の渦輪および壁面との相互作用により渦輪が切断されている。管状渦への遷移以降、流れ場が発達するに従い、管状渦は $\omega_j \partial_j u_i$ に起因した伸縮過程により大スケール (長い管状渦) 及び小スケールの渦へ連続的に変化し、それらが間欠的に空間分布している様子が解析により得られた。

謝辞 本研究は日本学術振興会科学研究費補助金 (若手研究 B) の助成を得て行ったものである。

参考文献

1) Gitterman et al., *J. Appl. Math. Mech.* **34**, (1970)

Table 1. Calculation conditions and analytical systems.

Initial bottom Pressure, p_0	229 (kPa)~400 (kPa)
Initial bath Temperature, T_0	4.50 (K)~5.30 (K)
Rayleigh Number, $Ra := g\beta \nabla T \cdot e_z L_z^4 / \nu D$	$1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^9$
Aspectratio, $\Gamma_x := L_x / L_z, \Gamma_y := L_y / L_z$	4.0~16.0

β : thermal expansion coefficient, ν : kinetic viscosity, D : Thermal diffusivity

スラッシュ窒素の圧力損失低減効果と熱伝達特性

Pressure drop reduction and heat transfer characteristics of slush nitrogen in pipe flows

大平 勝秀、高橋 則史、石本 淳、野澤 正和、高橋 幸一(東北大 流体研)

OHIRA Katsuhide, TAKAHASHI Norifumi, ISHIMOTO Jun, NOZAWA Masakazu, TAKAHASHI Koichi
(Institute of Fluid Science, Tohoku University)

E-mail: ohira@luna.ifs.tohoku.ac.jp

1. はじめに

極低温固液二相スラッシュ流体は、高密度流体、冷媒として優れた特性を持っている。燃料電池の飛躍的な普及、情報技術による電力需要の増加に伴い、発表者は図1に示す次世代エネルギーシステムを提案[1]しており、水素をスラッシュ水素の形態で長距離輸送(パイプライン)する際、MgB₂を利用した超伝導機器と組み合わせると、燃料と電力の同時輸送と貯蔵が可能となる(シナジー効果)。スラッシュ流体が水平管内を流動する際の熱・流動特性を解明するため、スラッシュ窒素を用いて研究を行っており、液体よりも管摩擦係数が減少する圧力損失低減効果を初めて明らかにした[2]。本発表では、スラッシュ窒素の固相率、流速、熱流束を変化させ、スラッシュ窒素の圧力損失低減効果と熱伝達劣化特性を同時に測定し、両者の相関性が初めて得られたので報告する。

2. 実験装置および実験方法

実験装置[3]の概略図を図2に示す。伝熱管には管外壁にニクロム線を無誘導巻きた内径15mm、長さ810mmの銅製水平円管を用いた。伝熱管内の局所熱伝達係数を測定すると共に伝熱区間長さ550mmの圧力損失を伝熱時に同時測定した。本実験では熱流束 $q = 10, 30 \text{ kW/m}^2$ 、固相率 $x = 10 \sim 40 \text{ wt}\%$ 、流速 $v = 1 \sim 5 \text{ m/s}$ の範囲で実験を行った。

3. 実験結果および考察

熱流束 $q = 30 \text{ kW/m}^2$ の場合に測定したスラッシュ窒素の圧力損失と局所熱伝達係数を図3に示す。実線で示すサブクール液体窒素の圧力損失は Prandtl-Karman 式、局所熱伝達係数は実測値である。熱伝達時のスラッシュ窒素の圧力損失と熱伝達係数は、熱流束 $q = 10, 30 \text{ kW/m}^2$ 、のいずれの場合も、ランタンクで測定した固相率 $x = 10 \sim 30 \text{ wt}\%$ 、管内流速 $v = 3.6 \sim 5 \text{ m/s}$ の範囲でサブクール液体窒素より低減(劣化)することを確認した。圧力損失が低減する領域が伝熱の無い場合[2]と類似していることから、伝熱時の固液二相スラッシュ流体の流動も同様な構造と考えられる。今後、固体粒子のPIV測定により流動構造を解明する予定である。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(基盤 B 18360096)により実施した。

参考文献

- [1] K. Ohira: J. Cryo. Soc. Jpn., Vol. 41(2006) pp. 61-72.
- [2] K. Ohira, et al.: Adv. Cryo. Eng., Vol. 53(2008) pp.67-74.
- [3] K. Ohira, et al.: Abst. CSJ Conference, Vol. 74(2006) p.124.

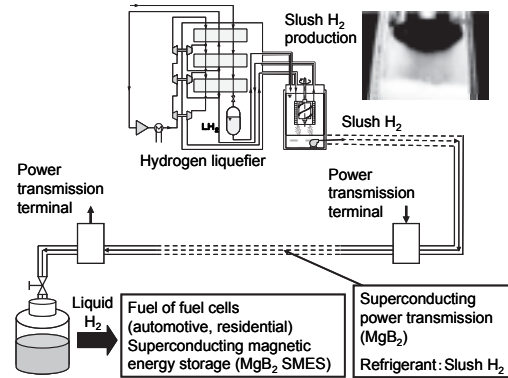


Fig.1 Synergetic effect of combination for slush hydrogen and superconducting equipments.

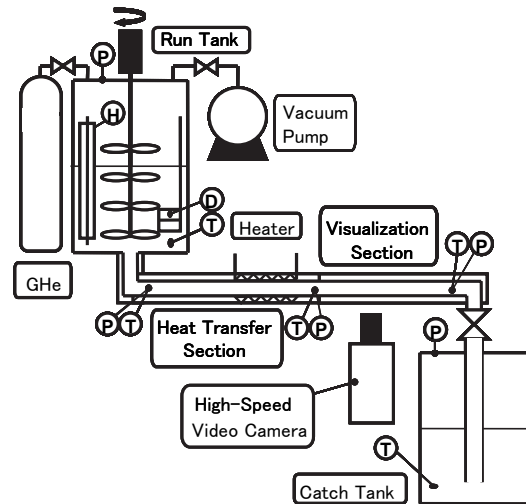


Fig.2 Test apparatus for the slush nitrogen test.

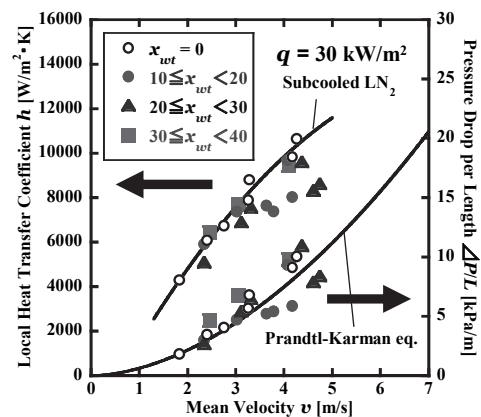


Fig.3 Pressure drop and heat transfer coefficient of slush nitrogen.

低温・希薄ガス雰囲気下における伝熱特性の実験解析

Experiments and Analyses of Heat Transfer Characteristics in Cryogenic, Low Pressure Environments

田中 芳親, 中内 正彦, 長嶋 賢 (鉄道総研)

TANAKA Yoshichika, NAKAUCHI Masahiko, NAGASHIMA Ken (Railway Technical Research Institute)

E-mail: 44tanaka@rtri.or.jp

1. はじめに

近年, 高温超電導体を回転子とした超電導電動機[1]や超電導軸受[2]などの研究が進められており, 浮上した回転子を冷却するなど, 低温, 希薄ガス雰囲気における非接触による伝熱に対するニーズが考えられる. このため非接触時の伝熱特性について把握を行う目的で, 低温下における, 希薄ガス圧力に対する熱伝達率の特性について, 実験により測定を行い理論値との比較を行うこととした.

2. 伝熱実験

低温, 希薄ガス雰囲気下での伝熱特性を検証するため, Fig.1 に示すような実験装置を利用して, 圧力に応じた伝熱特性の測定を行った. 実験装置は, 断熱を目的とした真空槽の内部にガス導入槽を設置しており, ガス導入槽の中に冷凍機に接続した冷却体とこれに対向して配置した被冷却体を設置している. 実験では, このガス導入槽に導入するガスの圧力を設定し, 冷却体を冷却することによる冷却体と被冷却体の温度変化から, 希薄ガス圧力に対する伝熱特性を求めた.

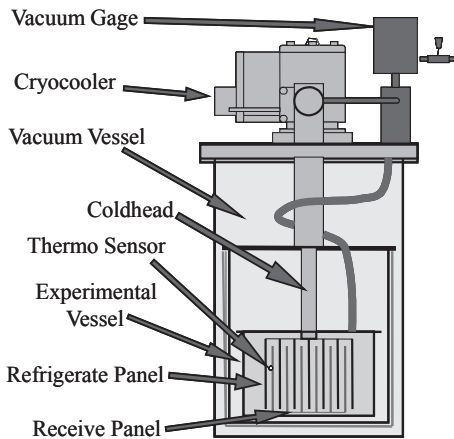


Fig.1 Experimental Set-up

3. 測定結果と解析

冷却体, 被冷却体の温度変化の測定値から算出した熱伝達率実験値を, ガス導入槽の圧力をパラメータとして表し, 理論値と比較した図を Fig.2 に示す. 実験の結果では, 低い圧力では熱伝達率は小さいが, ある圧力で急激に上昇し, その後はあまり上昇しないことが確認できた. 希薄ガス中の伝熱形態には輻射と気体分子伝導および対流がある[3]. このうち気体分子伝導による伝熱量は, 伝熱距離が気体分子平均自由行程と同等となる圧力以上になると大きく変化する. 熱伝達率実験値が大きく上昇した圧力付近での気体分子平均自由行程は, 本実験装置の冷却体, 被冷却体間の

距離と同レベルであったことから, 実験値の上昇は気体分子伝導による伝熱量の変化によるものと考察される. このため, 当該圧力以下の圧力領域と, これ以上の圧力領域に区分して, 熱伝達率の実験値と理論値を伝熱形態別に比較した.

比較の結果, 低い圧力領域では, 熱伝達率実験値と輻射による熱伝達率理論値はほぼ一致しており, この領域ではほとんどが輻射による伝熱であると考えられる. 一方, 高い圧力領域では, 実験値と気体分子伝導の理論値がほぼ一致しており, かつ, 輻射による熱伝達率はこれらに比較して無視できるほど小さいため, 気体分子伝導による伝熱が支配的であることが判明した. なお, 高い圧力領域において, 圧力が高くなるにしたがって実験値が気体分子伝導の理論値から乖離し, 徐々に大きくなる傾向を示すが, これは対流による伝熱の影響によるものと考えられる.

4. 結論

以上のような伝熱実験により, 低温下, 希薄ガス雰囲気における圧力に対する伝熱特性を確認することができた. また, 伝熱特性を理論値と比較することにより, 圧力領域に応じて支配的な伝熱形態を把握することができた. 今回得られた結果と伝熱特性は, 低温, 希薄ガス雰囲気下において非接触で冷却する必要がある, 高温超電導材の冷却などの検討に有効に利用できるものと考えられる.

参考文献

1. 中村武恒 他 : 第77回低温工学・超電導学会講演概要集, p.24
2. 清野 寛 他 : 第76回低温工学・超電導学会講演概要集, p.11
3. 株式会社アルバック編 : 「真空ハンドブック」, オーム社(2007)など

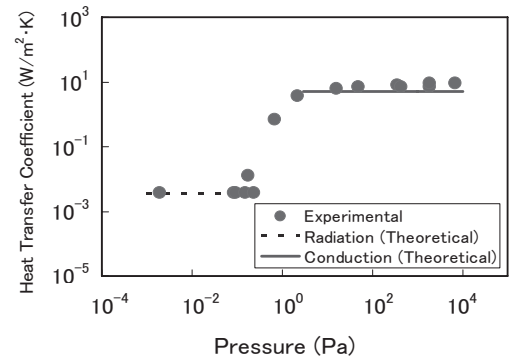


Fig.2 Heat Transfer Coefficient
(Experimental and Theoretical)

成分比が異なる人工空気の臨界点付近での Soret 効果に関する研究

Study on Soret effect in nitrogen-oxygen binary mixtures with different composition near their critical points

中納 暁洋, 前田 哲彦, 宗像 鉄雄 (産総研)
 NAKANO Akihiro, MAEDA Tetsuhiko, MUNAKATA Tetsuo (AIST)
 E-mail : a.nakano@aist.go.jp

1. はじめに

これまで我々は窒素と酸素を混合させた 2 成分系人工空気の臨界点付近での熱輸送現象について調査を行ってきた。成分比が窒素 79.1vol%、酸素 20.9vol%の人工空気の臨界点付近では、Soret 効果に係る熱拡散比が負値を示すことを昨年度春の会議において報告した[1]。温度勾配の形成により誘起される各成分の移動方向は、臨界点付近で形成される各成分の分子クラスターサイズと関連していると考えられることから、今回、成分比を逆転させた窒素 20.0vol%、酸素 80.0vol%の人工空気を用いて実験を行った。その結果この人工空気の場合、熱拡散比が正値を示すことを確認した。当日は人工空気のような共沸混合物的流体の、臨界点付近での Soret 効果に係る各成分の移動について考察を行った結果を報告する。

2. 実験装置及び手順

窒素-酸素 2 成分系人工空気における Soret 効果についての調査にあたり、単段の 2 チャンバーセルを用いて実験を行った。実験装置の概要を Fig. 1 に示す。2 チャンバーセルは 2 つの無酸素銅製容器 (セル) とそれを仕切る焼結ステンレス製多孔質ダイアフラムからなっている。片方のセルは GM 冷凍機のコールドヘッドに直接取り付け、もう片方のセルにはシースヒーターを巻き付け、2 つのチャンバー間で温度差を付けられるようにしている。定常状態となるのを待たため、温度差を保ったまま約 30 時間程経過させた後、図中上部に見える 2 つのサンプル容器に各セル内のサンプルガスを取り込んだ。これらサンプルガス中に含まれる窒素と酸素の濃度をガスクロマトグラフで測定し熱拡散比, k_T を求めた。

3. 実験結果

本実験において得られた結果を Fig. 2 に示す。Fig. 2a は窒素 79.1vol%、酸素 20.9vol%の人工空気における熱拡散比, k_T に-1 を乗じた値を、Fig. 2b は窒素 20.0vol%、酸素 80.0vol%の人工空気得た k_T を示す。なお、前者の推算臨界温度、及び臨界圧力は 131.61 K、3.8381 MPa、

後者の推算臨界温度、及び、臨界圧力は 149.27 K、4.8242 MPa とそれぞれ異なる[2]。よって、図中横軸には高温側セル内温度と低温側セル内温度の平均温度と臨界温度で整理した換算温度を採用した。Fig. 2a より窒素濃度が高い人工空気の臨界点近くでは熱拡散比の値が負となることが分かる。一方、Fig. 2b より酸素濃度が高い人工空気では熱拡散比が正の値を示すことが分かる。

4. まとめ

窒素-酸素 2 成分系人工空気の臨界点近くでの Soret 効果に係る各成分の移動方向は、濃度に依存すると考えられる分子クラスターサイズにより決定されることを強く示唆する実験結果を得た。

参考文献

- [1] A. Nakano : Abstracts of CSJ conference, Vol. 76 (2007) p. 57.
 [2] NIST Stand. Ref. Database 23, REFPROP Ver.8.0 (2007).

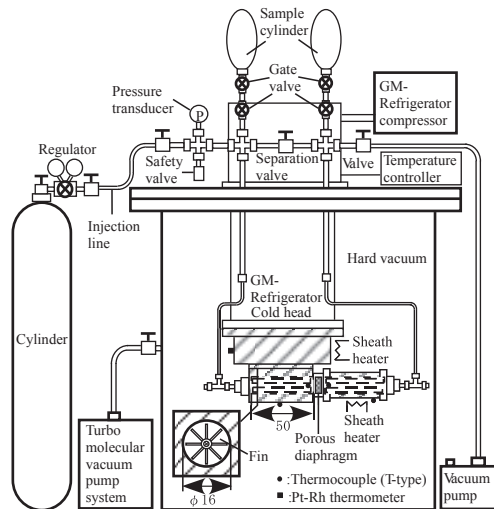


Fig. 1 Experimental set-up.

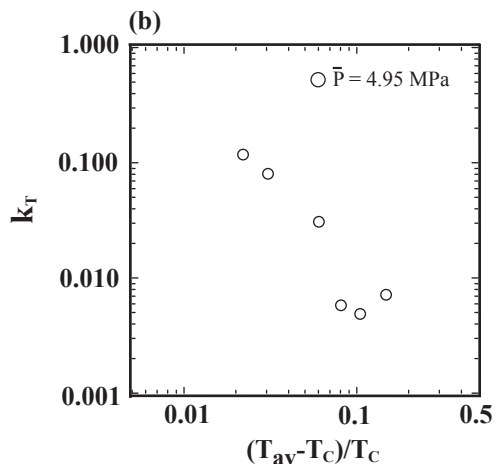
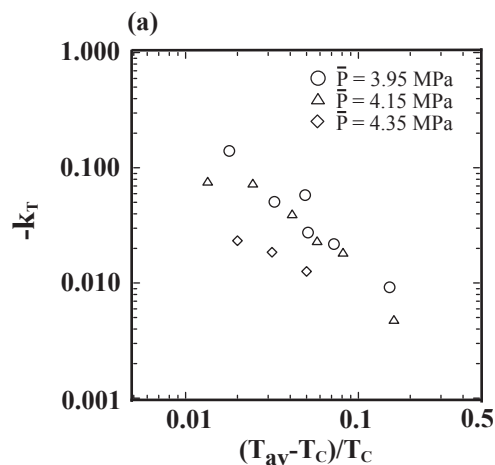


Fig. 2 Thermal diffusion ratio. (a) $N_2:79.1\text{vol}\%+O_2:20.9\text{vol}\%$, $T_c=131.61\text{ K}$, $P_c=3.8381\text{ MPa}$. (b) $N_2:20.0\text{vol}\%+O_2:80.0\text{vol}\%$, $T_c=149.27\text{ K}$, $P_c=4.8242\text{ MPa}$.

超伝導トンネル接合素子を用いたテラヘルツ波検出器アレイの開発とイメージング応用

Development of terahertz-wave detector array based on superconducting tunnel junctions and its imaging applications

有吉 誠一郎, 大谷 知行, ドブロユ アドリアン, 佐藤 広海 (理研); 田井野 徹 (埼玉大); 松尾 宏 (NAOJ); 清水 裕彦 (KEK)
 ARIYOSHI Seiichiro, OTANI Chiko, DOBROIU Adrian, SATO Hiromi (RIKEN); TAINO Tohru (Saitama univ.); MATSUO Hiroshi
 (NAOJ); SHIMIZU Hirohiko (KEK)
 E-mail: ariyoshi@riken.jp

1. はじめに

電波と光波の境界領域に位置するテラヘルツ波 (周波数 0.3THz~10THz、波長 1mm~30 μ m) は、プラスチックやビニル、紙、繊維、木材、セラミック、乾燥食品などには透過し、金属や水分に不透明の特性をもつ。この特性を活かして、様々な工業製品や食品等の非破壊検査、医療応用、DNAや蛋白質の生体内構造解析など、その応用範囲は産業界全体に波及すると期待されている。加えてテラヘルツ波は、天文分野において、初期宇宙における銀河の爆発的星形成領域の星間塵から放射された強力かつ赤方偏移した黒体放射のピーク周波数帯にあたり、原始銀河の探査や銀河形成・進化の解明のために、遠方天体からの微弱な信号を受光可能で広域のサーベイにも適した超高感度のアレイ型検出器が求められている。しかし、このバンドで超高感度かつ短時間イメージングを行うために必要な多素子検出技術は未開拓である。そこで、超伝導トンネル接合素子 (STJ) を用いた超高感度テラヘルツ波検出器とアレイ化に向けた研究開発を行っている。

2. 超伝導検出器アレイとイメージング

STJ 素子とは、超伝導体-絶縁体-超伝導体という3層の膜構造 (SIS 構造) を基本とするジョセフソン素子の1種であり、極低温 (<0.7K) 冷却により超伝導体内の準粒子 (単一の電子) を極めて少なくしておき、光入射時の準粒子の光子誘起トンネリングで発生する電流信号を検出することによりテラヘルツ波センサーとして動作する。検出器1画素は、ニオブ超伝導体の平面アンテナと超伝導マイクロストリップラインを STJ 素子で橋渡しした膜構造を有する。

図1に試作した STJ 検出器 36(6 \times 6)画素アレイを示す。将来的な大規模アレイ実現に向けて、複数素子の電気特性と光学特性を評価した[1]。具体的には、まず、画素不良を極力減らすことを目的として、合計 50 画素に及ぶ STJ 検出器の電流電圧特性を測定した結果、STJ 検出器の作製歩留まりは 90%、STJ 素子単体では 99%という高い作製歩留まりを達成した。次に、光学特性の均一性を評価するために、フーリエ変

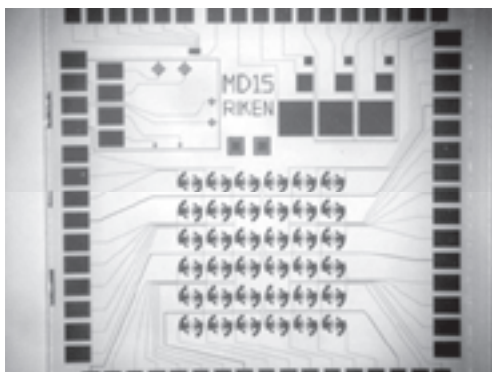


Fig.1 Photograph of STJ detector array with 36 (=6 \times 6) pixels. The array has been fabricated on a 5 mm-square sapphire substrate. The distance between adjacent pixels is 325 μ m in the current design.

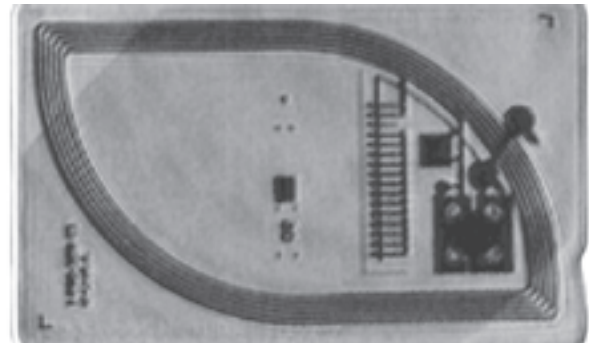


Fig.2 Terahertz image of a railway payment IC card. This card is 50 \times 85 mm² in size and 1 mm thick. The scanning step is 200 μ m.

換分光器を用いて STJ 検出器 25 画素分の周波数感度特性を測定した。その結果、25 画素全てで中心周波数 0.65THz (帯域幅 \sim 0.1THz) のバンドパス特性を示し、その個体差は約 1.3%の周波数範囲内で同等であることを確認した。

その後、後進波管をテラヘルツ連続波光源とするイメージングシステム[2]を使用して、STJ 検出器のイメージング性能を評価した。図2は検出器1画素で取得した IC カードのテラヘルツ透過画像である[3]。6本のループアンテナや電子回路の内部構造が非破壊かつ適度な空間分解能で透視できている。さらに 25 画素アレイを用いた場合には、1 画素検出器に比べて最大 25 倍のスピードで画像取得可能である。今後、更なる大規模アレイ化を推し進めることで、より短時間のリアルタイムイメージングが可能になると考えている。

3. 今後の展望

天文応用では、理研と国立天文台との共同のもと、STJ 検出器アレイを南米チリの天体望遠鏡に搭載し天文観測に向けた準備を進めている[4]。一方、産業応用に向けて、従来の冷媒 (液体ヘリウム) を用いた 0.3K 冷却系ではなく、機械式 4K 冷凍機ベースの簡便な 0.3K 冷凍機システムを設計・構築した。この冷凍機システムは、コンパクトかつ軽量でありながら地盤振動レベル以下にまで除振対策を施し、さらに長時間運用 (162 時間@0.3K) かつ全自動冷却オペレーション可能という従来にない優れたパフォーマンスを実現している。これまで、超伝導検出器の波及という点で障害であった「極低温」への困難さが急速になくなりつつあり、STJ 検出器を様々な分野へ普及させる好機が訪れている。

参考文献

1. S. Ariyoshi, et al.: Jpn. J. Appl. Phys., Vol.45, No.37, (2006) p.L1004.
2. A. Dobroiu, et al.: Applied Optics, Vol.43, No.30, (2004) p.5637.
3. S. Ariyoshi, et al.: Appl. Phys. Lett., Vol.88, (2006) p.203503.
4. H. Matsuo, et al.: Proc. SPIE, Vol.6275, (2006) p.627504.

1K 以下での NMR 信号検出法の開発

Development of methods for detecting NMR signals below 1K

藤井宗明(熊本大)

FUJII Muneaki (Kumamoto university)

E-mail: fujimune@sci.kumamoto-u.ac.jp

1. はじめに

共鳴現象に伴う磁場や温度の小さなゆらぎを観測して NMR 共鳴点を検出する方法を開発した。

キュリー温度 T_C (or ネール温度 T_N) 以下の温度での磁性イオンの NMR は外部から磁場を印可しなくても観測可能である。これは超微細相互作用のため核スピンの感じる有効磁場のためである。この NMR 信号を見つけることにより物質の内部構造に関する多くの情報を得る。

超微細相互作用による核スピンの共鳴周波数はふつう 10MHz から 800 MHz の広い範囲にわたる。共鳴現象はトリガー型の現象であり、信号の大きさ自体よりどの周波数で共鳴が起こるかの印を見つけることがまず重要である。外部磁場を加えて NMR 周波数をスキャンする方法もあるが、零磁場の場合、千倍から十万倍位の信号増強因子を得るので信号の検出には有利である。

NMR 共鳴点の検出にはラジオ波の共鳴信号そのものを検出しなくても、共鳴現象に伴う磁場や温度のゆらぎを観測する方法がある。特に、熱雑音や電磁気雑音の小さくなる 1K 以下の極低温ではそれらの方法が極めて有効であることが明らかとなった。この方法は同調回路を必要としないので広範囲の周波数の NMR 共鳴点が容易に検出可能である。

2. 温度のゆらぎを観測する方法

希釈冷凍機を用いての mK 温度域での NMR 実験において、特に冷凍機の能力の限界近くの低温では、物質にもよるが、NMR 共鳴点でわずかな温度上昇が観測されることがある。これは核スピンの系に電磁波のエネルギーが流入したことによると見られる。この温度上昇を NMR の共鳴点を探す際の印として利用する。

希釈冷凍機は、おおまかにいえば、熱交換器、混合室、分留器そして室温部にあるガス操作系よりなる。混合室と 2 つの対称に作られた試料室は、渦電流損失による発熱を押さえるため、すべて非金属(スタイキャスト 1266)で作られている。試料と温度計は ^3He - ^4He 希釈相に直接浸されており、熱接触は良好である。二重管式熱交換器の内側の管を通して来たほぼ純粋な液体 ^3He は混合室上部の相分離面を通過して液体 ^4He の中に希釈され冷える、その後 2 つに分かれ、試料室内の試料を冷やし、ふたたび混合室の上部で合流し、熱交換器で上から流入してくる ^3He を冷やしながらか、分留器に帰っていく。

試料の発熱に対して敏感な温度計は下流に配置した温度計である。カーボン抵抗を薄く削り、熱容量を小さくし、 ^3He - ^4He 希釈相との熱接触を良くすることが肝要である。

試料を ^3He - ^4He 希釈相に直接浸す方法を採用したので、試料の交換のためには、簡単に着脱可能で、超流動状態のヘリウムでもリークのない、信頼性のある真空シールが必要である。我々はソープグリセリンシールを用いている。ソープグリセリンは、石鹸とグリセリンを混ぜたもので、室温では半透明のゼリー状の物質で、80°C 位に暖めて液状になったものを、シールしたい部分に薄く塗布して使用する。液状であるうちにシール部に圧力をかけ、出来るだけうすくのぼすのが肝要である。混合室下

部のポートの部分にはネジを切っているが、その上部のすりあわせ部分と、対応する試料室の部分に、ソープグリセリンを塗布し、ヘアードライヤーで暖めながら、手早くネジを締める。すりあわせ部分が精密に作られていれば、ソープグリセリンの代わりに、普通の真空グリースでも良いが、室温での ^3He ラインの内部の掃除とリークテストのためには、ソープグリセリンの方が使いやすい。

試料交換のためには、クライオスタット全体を室温にもどさなければならぬ。その時、 ^3He の通るラインの内側も空気にさらされるので、試料室を混合室のポートに取り付けた後、ラインに ^4He ガスを流して、特に、熱交換器、インピーダンスの内部に、空気、水分が残らないようによく掃除する必要がある。極低温の実験では、液体ヘリウムをクライオスタットに汲みまゑに、断熱真空部への漏れを調べる、いわゆるリークテストをしなければならぬが、ラインに ^4He ガスを流して、掃除とリークテストを同時に行っている。

3. 磁場のゆらぎを観測する方法

共鳴点においては核スピンの歳差運動運動の角度が変化する。それによる磁場の変化を SQUID を用いて観測することにより NMR 共鳴点を検出することが可能である。この方法も同調回路を必要としないが外部からの磁気雑音を遮断することが必要である。

細線周りにおける加圧 He II 中の膜沸騰の可視化観測 Visualization study of film boiling in pressurized He II around thin wire

高田 卓, 横田 尚也, 村上 正秀 (筑波大学), 木村 誠宏 (KEK)

Suguru Takada, Naoya YOKOTA, Masahide Murakami (Univ. of Tsukuba), Nobuhiro Kimura (KEK)

E-mail: s-takada@edu.esys.tsukuba.ac.jp

1. はじめに

He II における膜沸騰研究は飽和 He II 中または、大気圧下における He II 中の膜沸騰について主に展開されてきた。特に飽和 He II 中における膜沸騰においては蒸気膜厚さとヒータ温度の関係からある一定の結果を得ている^{1,2)}。しかし、三相共存状態であり、飽和 He II とはその性格を異にする加圧下の He II 膜沸騰研究においては、熱輸送に決定的な影響を与える蒸気膜の厚さの情報が無い。

本研究では研究の第一報として、細線ヒータ ($\phi 50 \mu\text{m}$) を用いて膜沸騰を引き起こし、ヒータ温度の測定と同時に、その蒸気膜厚さについて可視化した実験結果について報告する。

2. 実験方法

可視化窓付きクラウド型クライオスタットにステンレス (SUS304) 線ヒータを水平方向に張り、電流を流すことで膜沸騰を引き起こした。SUS304 については約 40K 以上において電気抵抗が温度に対して一意に決まるため、ヒータであるとともにヒータ温度を測る温度計としても使用した。ヒータ線が $\phi 50 \mu\text{m}$ と微小なため、ヒータ線温度は径方向には一様だとみなしている。

また、光源にはキセノンランプを使用し、撮影にはハイスピードビデオカメラを使用した。また、テレセントリックレンズを使用することで被写体深度の深い、約 $10 \times 2.5 \text{ mm}$ のゆがみの無い像を得ることに成功した。

3. 実験結果

Fig.1 には大気圧下での He II 膜沸騰モード (強サブクール膜沸騰³⁾) の代表的写真を示す。このようにして撮影された画像を 2 値化、画像処理によって平均蒸気膜厚さを計測することが出来る。Fig.2 はヒータ温度を横軸に蒸気膜厚さをプロットしたものであり、どの温度帯においても蒸気膜厚さはヒータ温度のおよそ 3/4 乗に比例した関数になっている。

また蒸気膜厚さと膜沸騰熱伝導率の関係を Fig.3 に示した。これにより平均蒸気膜の厚みに強く依存して膜沸騰熱伝達率が決まっていることが分かる。蒸気膜が非常に薄い場合液温による熱伝達率の差は無い。しかし蒸気膜が厚い比較的熱流束の高い場合では、液温が低いほど沸騰熱伝達率は高くなる。これらは全て大気圧下におけるデータであるため、ヒータ面に広がる蒸気相の密度等に違いは無く、液相側の熱輸送特性を反映した結果である。

4. 結論

本実験により、加圧 He II 中の He II 膜沸騰について可視化による蒸気膜厚さの測定、熱流束・ヒータ温度という

膜沸騰における支配的パラメータの全てを同時に測定することに成功した。



Fig.1 Typical visualization result of the strongly subcooled film boiling mode at $T_b = 1.9 \text{ K}$, $q = 90 \text{ W/cm}^2$

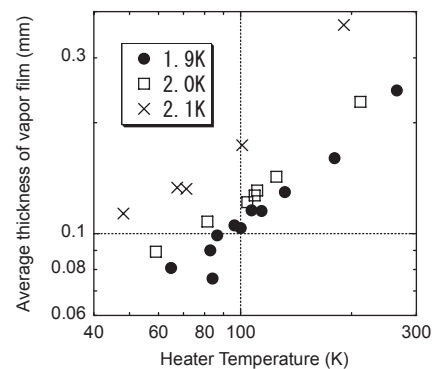


Fig.2 Average thickness of vapor film depending on heater temperature at several temperatures under atmospheric pressure condition

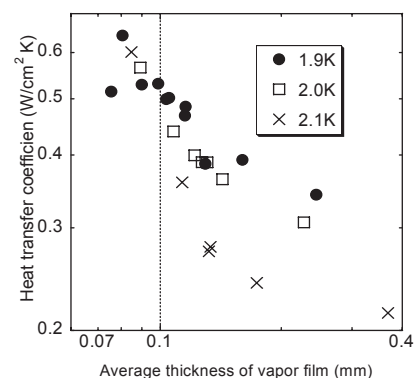


Fig.3 Correlation between Heat transfer coefficient and Average thickness of vapor thickness

参考文献

- 1) F. Jebali, J. Maza, M.X. Francois and F. Vidal, Adv. Cryo. Eng., 33 (1988), p. 425-430.
- 2) F. Jebali and M. X. Francois, Physica B194 (1994), p.599
- 3) M. Nozawa, M. Murakami, N. Kimura and S. Takada, Adv. Cryo. Eng., 51 (2006), p. 393-400.

自由落下塔の微小重力環境で用いる He II 用可視化実験装置の開発

A development of visualization experimental setup for He II under microgravity environment using a free fall shaft

木村 誠宏(KEK)、高田 卓(筑波大)、後藤修一(ジェック東理)、川又 弘史、飯田 真久、仲井 浩孝(KEK)、村上 正秀(筑波大)、永井 秀明、間宮 幹人(産総研)

Nobuhiro KIMURA (KEK), Suguru TAKADA(Univ. of Tsukuba), Shuichi GOTOH(JEC TORI), Hiroshi KAWAMATA, Masahisa Iida, Hirotaka NAKAI(KEK), Masahide MURAKAMI(Univ. of Tsukuba), Hideaki NAGAI, Mikito MAMIYA(AIST)
E-mail: s-takada@edu.esys.tsukuba.ac.jp

1. はじめに

微小重力下において He II の熱流動現象がどのように現れるかという問題は、物理的な興味のみならず、超伝導磁石を用いた宇宙空間における高エネルギー宇宙線観測計画(AMS-02)などの応用から工学的な研究テーマとなっている¹⁾。しかし、これまで実験例のある航空機のパラボリックフライトを用いた方法¹⁾では莫大な費用と高い安全設計が求められ、様々な実験を繰り返し行うことには大きな困難を伴う。そこで、自由落下塔を用いることでこの問題を解消し、容易に繰り返し可能な微小重力下での He II 熱流動現象の可視化実験を提案した。

2. 自由落下塔

産総研北海道センターに設置されている開放型の自由落下塔を使用した。本設備は、およそ 10m の自由落下の後に 3m のマグネットブレーキがかかるシステムになっており、1.3 秒間の mG オーダーの微小重力環境が実現されている (Fig. 1)。開放型であるため排気される He ガスについて特別な措置を施す必要は無い。一方、二重構造のカプセルを落下させる本システムでは積載重量を 100kg 以内、φ720 X 820mm の円筒形のカプセルに実験装置を収めるといった制約がある。このため非常に小型のクライオスタットを搭載することが求められた。

3. 可視化用小型クライオスタット

本実験に用いたクライオスタットの大きさはおよそ φ420 x 720 mm であり、排気用ドライポンプなどや計器を含めた総重量は約 80 kg であった。Fig. 2 に示すように液溜め部が 2 槽に分けてある。下方の液溜め部がテストチャンパーであり、微小重力下においてもテストチャンパー内をスロッシングの影響を受けない単相として保持される。また、φ10mm の窓ガラスが取り付けられて、可視化可能である。更に、排気ラインにバイパスとしてポラスプラグが組み込まれており、ニードルバルブを閉めた mG 落下の際に、気液分離機として作用する³⁾。

4. オペレーション

初回の試みとして、片側に LED 光源もう一方にハイスピードカメラを設置し微小重力下における可視化実験を行った。結果としてクライオスタットやオシロスコープ・カメラなどの計測機器は全て制動時にかかる重力に耐え健全に動作し、超流動に保持し実験することに成功した。

この落下塔設備は、落下させてから、装置を引き上げ、次にクライオスタットを操作するまでの時間が 15 分程度である。そのため一日十数回の実験を行う事が出来た。また、クライオスタットは一度の注液で約 4 時間超流動状態を維持した。

なお、Fig. 3 は微小重力下における超流動中の膜沸騰の様子を撮影した際のスナップショットであり、写真下端にある細線ヒータから蒸気膜が広がり、上部に設置した細線(予備ヒータ)の影響を受けて変形している様子である。

4. 結論

コンパクトなシステムという問題をクリアし、落下塔における微小重力下の He II 可視化実験を繰り返し行うことに初めて成功した。小型クライオスタットを軸としたシステムは健全に機能し、その実用性・安全性を証明できた。

謝辞

本研究は科研費(基盤 B 18360410)の補助により遂行された。

参考文献

- 1) J.A. Lipa et al, *Cryogenics* **34** (1994) pp.341-347
- 2) H. Nakai and M. Murakami, *Cryogenics* **27**(1987) pp. 442-449

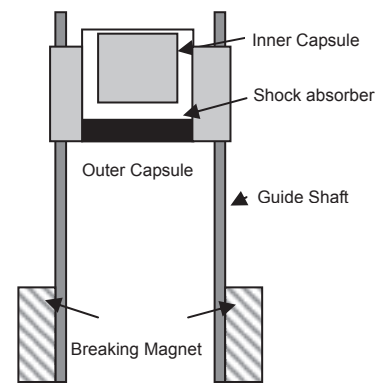


Fig.1 Schematic illustration of Free Fall tower

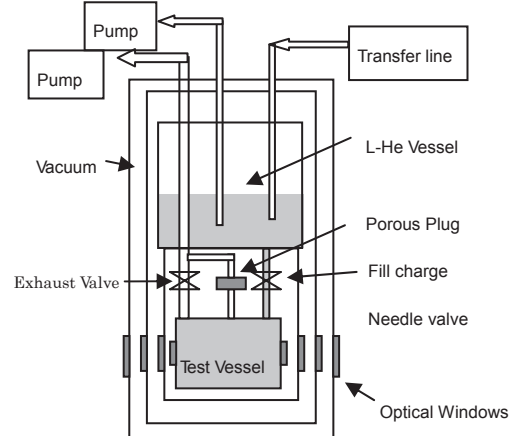


Fig.2 Schematic illustration of mini-cryostat for visualization



Fig.3 A visualization result of film boiling under micro gravity

液体水素表面の減衰振動

Damped oscillation of liquid hydrogen surface

八木 翔, 武田 実 (神戸大学 海事科学研究科)

YAGI Sho, TAKEDA Minoru (Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University)

E-mail: takeda@maritime.kobe-u.ac.jp

1. はじめに

水素は反応後に水のみが発生するため、環境に優しい究極のクリーンエネルギー源として注目されている。水素を大量輸送・貯蔵する形態として、貯蔵効率の観点から液体水素が有利であると考えられている。液体水素を輸送・貯蔵する場合、安全面や経済面において液量の正確な把握が求められ、高精度液面計が必要不可欠となる。現在、 MgB_2 線材をベースとした高精度な液体水素用超伝導液面計の開発研究^{1), 2)}が進められているが、動的な液面検知特性等の詳細は明らかになっていない。そこで本研究では、液面計の動的特性等を調べるための予備的研究として、減衰振動する液体水素表面を観測し、振動解析を行った。その結果と他の極低温液体(窒素、ヘリウム、超流動)³⁾のそれとを比較して、振動状態の違いについて調べた結果を報告する。

2. 実験装置と実験方法

観測実験では、液体水素用光学クライオスタットおよび横振動試験装置³⁾を使用した。光学クライオスタットは、外側から液体窒素槽(10.0 L)、液体水素槽(13.6 L)、サンプル槽(3.8 L)の3槽構造になっている。始めにサンプル槽の光学観測窓(有効直径 50 mm)のほぼ中央に液体水素の液面をセットした。次に、横振動試験装置より0.1 Gの加速度を0.2秒間与えた後に、液面が減衰振動する様子を観測窓に取り付けたデジタルカメラで撮影した。撮影間隔は1/30秒であり、また撮影時間は約1.5秒である。

3. 実験結果と考察

Fig.1に1気圧の振動時における液体水素表面の写真を示す。静止時の液面角度を $\theta = 0$ 度とし、液面が右上がりの状態を正とした。加速度を受けた液面は、最大液面角度 $\theta_{max} = 9.5$ 度を示した後に、時間とともに減衰して行った。 θ_{max} を示す時刻を $t = 0$ 秒として、液面角度の時間変化の様子をFig.2に示す。これは、同じ条件下で5回測定したものの平均値を示している。この図より、周期 T は0.372秒であった。

液面角度の時間変化を解析するために、減衰振動モデルを採用した。制動力の効果が復元力のそれよりも小さく、液面角度も小さいとして得られたモデル近似曲線をFig.2に実線で示す。この近似線は、制動(減衰)係数 γ を調整パラメータとして最小二乗法により求めたものである。Table 1は、液体水素を含む種々の極低温液体で得られた結果である。 γ と動粘性係数との関係について調べたところ、両者は比例関係であることがわかった。 T と物性値との関係は考察中であり、詳細は講演で報告する。

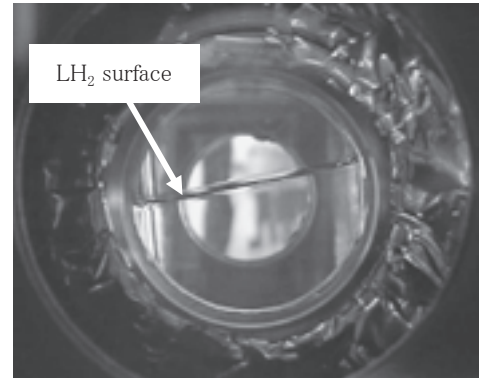


Fig. 1 Photograph of LH_2 surface under observation through optical window.

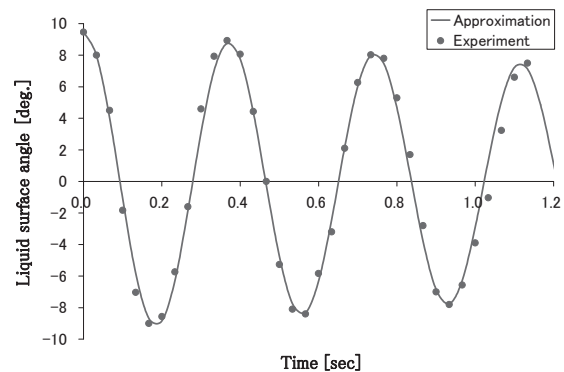


Fig. 2 Time chart of LH_2 surface angle.

Table 1 Experimental results of some cryogenic liquids.

Subject	θ_{max} (deg.)	T (sec)	γ (1/sec)
LN_2 (77.3 K)	9.5	0.380	0.239
LH_2 (20.3 K)	9.5	0.372	0.215
LHe (4.2 K)	9.5	0.433	0.200
He II (2.0 K)	9.5	0.363	0.180

謝辞

本研究の一部に対して、岩谷瓦斯(株)からの援助を受けました。ここに謝意を示します。

参考文献

- 1) Y. Matsuno *et al.*: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.49
- 2) S. Kamiya *et al.*: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.50
- 3) S. Yagi *et al.*: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.288

熱音響自励振動を用いた液体窒素液面位置の測定

Measurements of liquid nitrogen level using the thermoacoustic spontaneous gas oscillation

青井 良文, 上田 祐樹(農工大)

Yosihumi Aoi, Yuki Ueda (Tokyo University of Agriculture and Technology)

E-mail: 50008401201@st.tuat.ac.jp

1. はじめに

まっすぐな管の軸方向に臨界値以上の急激な温度勾配を付加すると、管内の気体が不安定となり、振動を始める。これは熱音響自励振動と呼ばれる現象である。熱音響自励振動が発生する温度勾配の臨界値は管の境界条件に依存する。この臨界値の境界条件への依存性を利用し、液体ヘリウムの液面を測定することができる。この測定原理を応用し、液体窒素の液面位置を測定する実験を行った。

2. 実験装置

液体ヘリウムの液面の測定には内径 2 mm 程度の単純な細長い管を用いる。室温を 280 K と仮定し、液体ヘリウム(沸点温度 4K)が入ったデュワー瓶に管を挿入すると、管に 280 K と 4 K の急激な温度勾配がつき、熱音響自励振動が発生する。液体ヘリウムの代わりに液体窒素(沸点温度 77 K)を用いると、単純な管を用いては熱音響自励振動が発生するほどの温度勾配を得ることができない。

本研究では 77 K と室温の温度勾配で熱音響自励振動を発生させるために管の中に狭い流路を持つスタックを挿入した。製作した液体窒素液面計を Fig. 1 に示す。管の長さは 0.60 m、管の直径は 25 mm とした。管の形状は片側開端、片側閉端とした。用いたスタックの流路半径は 0.66 mm、長さは 80 mm とした。管の閉端部に圧力センサを取り付けた。圧力センサから得た信号を増幅器で増幅し、FFT アナライザに入力し、閉端部の圧力振幅と振動周波数を得た。

3. 実験結果

Fig. 1 に示した装置を Fig. 2 のように液体窒素が入ったデュワー瓶に挿入した。この時の瓶入口から液面までの長さ X_{N_2} と瓶入口から瓶の底までの長さ X_D の比は 0.70 であった。 (X_{N_2}, X_D) については Fig. 2 参照) 管の挿入長さ X_T を徐々に増やしながら閉端での圧力振幅 P を測定した。 X_T/X_D と P の関係を Fig. 3 に示す。Fig. 3 に示したように X_T/X_D が 0.50 の時、熱音響自励振動が起り圧力振幅 P が観測される。 X_T/X_D を 0.50 から増やしていくと圧力振幅は徐々に大きくなった。しかし X_T/X_D を 0.68 から 0.70 に増やした時、圧力振幅は 1.3 kPa から 16 Pa まで急激に小さくなった。このとき振動周波数は 82.3 Hz から 33.9 Hz に変化した。この急激な圧力振幅の変化が起こる位置 $X_{T,cr}/X_D = 0.69$ は $X_{N_2}/X_D = 0.70$ にほぼ等しい。したがって、この振幅の低下および周波数の変化は管の閉端部が液体窒素の液面に達したために起こったと言える。つまり、熱音響自励振動の圧力振幅と振動周波数の変化から液体窒素の液面を明らかにできた。

4. まとめ

実験により、従来からある液体ヘリウムの熱音響自励振動を用いた液面測定と同様の測定原理で、デュワーに入った液体窒素の液面を測定できることがわかった。今後は様々な X_{N_2}/X_T において同様の実験を行い、 $X_{T,cr}/X_D$ と X_{N_2}/X_T の関係を調べる。

参考文献

1. Akira Tominaga, Taichi Yazaki, Yoshimasa Narahara: Stability Limit for Thermally Driven Acoustic Oscillation, Teionkougaku Vol. 14 (1979) p.122
2. N.Rott: Thermally Driven Acoustic Oscillations. Part II :Stability Limit for Helium, Journal of Applied Mathematics and Physics vol. 24 (1973)

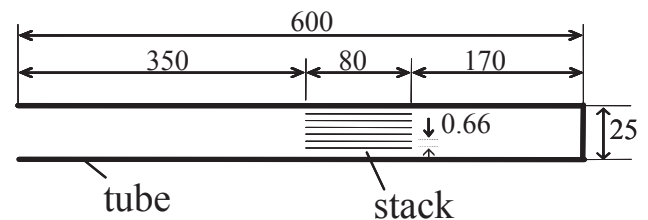


Fig.1 A tube inserted the stack

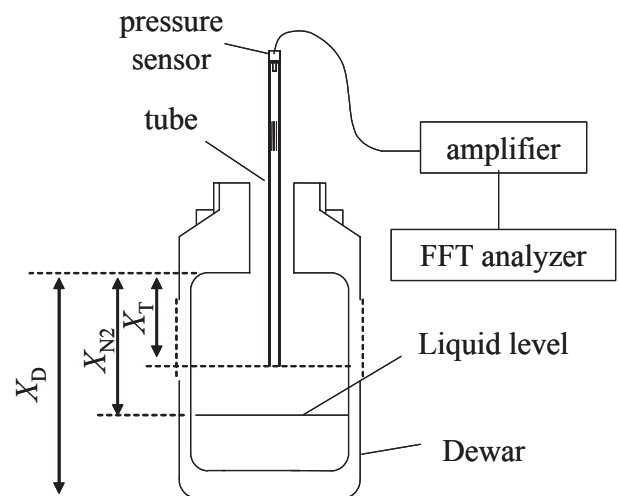


Fig.2 Schematic drawing of the experimental set up

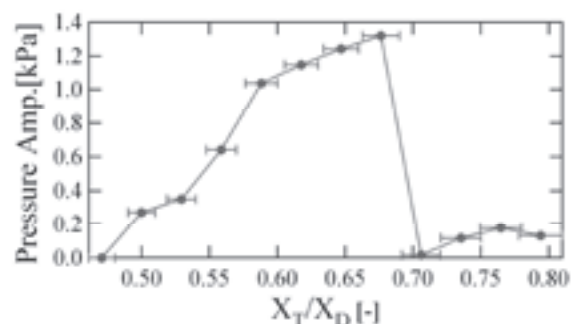


Fig.3 Pressure amplitude vs. X_T/X_D

3ply-DI-BSCCO テープ中の BSCCO フィラメント破断ひずみの増大 Increase in fracture strains of BSCCO filaments inside 3ply-DI-BSCCO tapes

大澤 健太, 北條 正樹(京大); 長村 光造(応用科学研); 綾井 直樹(住友電工)
OSAWA Kenta, HOJO Masaki(KYOTO Univ.); OSAMURA Kozo(RIAS); AYAI Naoki(SEI)
E-mail: osawakenta@t02.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

Bi2223(BSCCO)フィラメントは引張破断ひずみが 0.1%程度と小さい⁽¹⁾ことが知られている. DI-BSCCO テープのひずみ特性および力学特性を改良するため, ステンレス, 真鍮を積層した 3ply 材について実験を行い, 力学的負荷が I_c に及ぼす影響を調べた.

2. 試料

試料に加圧焼成(DI)法により作成された住友電工(株)製 DI-BSCCO テープ(Insert), およびそのテープにステンレス, 真鍮を積層した国際標準化用 SUS3ply-DI-BSCCO テープ(SUS3ply), Brass3ply-DI-BSCCO テープ(Brass3ply)を用いた.

Table1. Structure of samples

Category	Sample #	Structure
Original Tape	Insert	Bi2223 + Ag +Ag alloy
3ply Tape	SUS3ply	Insert + Stainless
	Brass3ply	Insert + Brass

3. 実験および解析方法

積層による弾性率の変化を調べるために, 室温および液体窒素温度での引張試験を, 複合線材中の BSCCO 超伝導フィラメントの破断ひずみを調べるために, 液体窒素下での 99%不可逆 I_c ひずみ測定を行った.

また, 複合線材中の構成要素の残留ひずみおよび残留応力を検討するために製造時の熱履歴と補強材はんだ付け時に加わる応力を考慮して残留応力解析を行った.

4. 実験と解析結果および考察

室温での引張試験結果を Fig.1 に示す. 複合線材の弾性率 E_c (Insert), E_c (SUS3ply), E_c (Brass3ply)はそれぞれ, 86GPa, 103GPa, 102GPa であった. 補強材を積層したテープは Insert テープに比べ弾性率が增大していることが示された. 線材の 99%不可逆 I_c ひずみ $\epsilon_{i,c}$ (Insert), $\epsilon_{i,c}$ (SUS3ply), $\epsilon_{i,c}$ (Brass3ply)はそれぞれ, 0.25%, 0.40%, 0.40%であり, 補強材を積層することで $\epsilon_{i,c}$ が大幅に増加していることを示した

また, 残留応力解析で求められた Bi2223 フィラメントに残留するひずみ $\epsilon_{r,Bi}$ (Insert), $\epsilon_{r,Bi}$ (SUS3ply), $\epsilon_{r,Bi}$ (Brass3ply)はそれぞれ, -0.09%, -0.11%, -0.17%と見積もられた.

以上の結果より, 複合線材中の BSCCO フィラメントの破断ひずみ $\epsilon_{f,Bi}$ (Insert), $\epsilon_{f,Bi}$ (SUS3ply), $\epsilon_{f,Bi}$ (Brass3ply)はそれぞれ, 0.16%, 0.29%, 0.23%となり, 補強材を積層することで複合線材中の BSCCO フィラメントの破断ひずみが増大することが示された.

補強材を積層することで BSCCO フィラメントの破断ひずみが増大した原因は, ばらつきが非常に大きい BSCCO フィラメントの破断強度が関与していると考えられる. Rokkaku らの研究⁽²⁾によると BSCCO フィラメントのワイプルの形状因子は 2.5 と報告されている. これは一般のセラミックス材料に比べてさらに小さいものである. このフィラメント破断強度がばらつくこと, 補強材を積層することでフィラメントの応力負担割合が減少し複合線材中の BSCCO フィラメントの微小き裂部の応力が緩和することで, BSCCO フィラメント中のき裂が多段的に進展した結果, 線材中のフィラメントの破断ひずみが増大したと考えられる.

5. 結言

3ply-DI-BSCCO テープは Insert テープに比べ引張特性が優れ, 99%不可逆 I_c ひずみが向上していることを確認した. 熱履歴より計算で求めた線材中の BSCCO フィラメントの残留ひずみと, 99%不可逆 I_c ひずみより線材中の BSCCO フィラメントの破断ひずみを決定した. その結果, Insert テープに比べ SUS3ply, Brass3ply テープともに線材中の BSCCO フィラメントの破断ひずみが顕著に増大していることを明らかにした.

参考文献

- (1)M.Hojo et al., Physica C, 463-465 (2007) 863-866
- (2)H.Rokkaku et al., Physica C, 445-448 (2006) 756-761

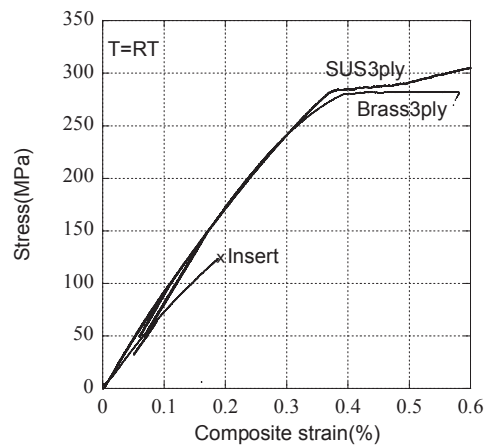


Fig.1. Stress-strain curve.

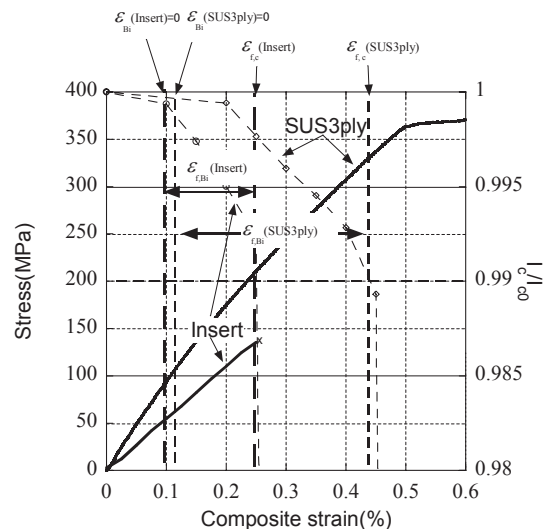


Fig.2. I_c dependence on composite strain.

Table2. Fracture strain and residual strain.

	$\epsilon_{r,Bi}$ (%)	$\epsilon_{f,c}$ (%)	$\epsilon_{f,Bi}$ (%)
Insert	-0.09	0.25	0.16
SUS3ply	-0.11	0.40	0.29
Brass3ply	-0.17	0.40	0.23

Ni 内部酸化型バリア線材の作製と評価

Fabrication and properties of Bi2223 tapes with NiO barrier formed by in-situ oxidation process

中村 雄一, 塩入 稔章, 永岡 篤, 町田 智弘, 來原 央, 稲田 亮史, 太田 昭男 (豊橋技科大)

NAKAMURA Yuichi, SHIOIRI Toshiaki, NAGAOKA Atsushi, MACHIDA Tomohiro, KURIHARA Chikasa, INADA Ryoji, OOTA Akio (Toyohashi University of Technology)

E-mail: nakamura@eee.tut.ac.jp

1. はじめに

超電導線材を各種交流電力機器に応用する場合、交流磁界下における交流損失の低減が課題となる。この交流損失低減のため、Bi2223 超電導フィラメント間に高抵抗材料をバリア層として介在させた線材の開発が重要である。その高抵抗バリア層の導入方法として、従来広く用いられている酸化物の粉末を塗布する方法に比べ、延性材料である金属としてバリア原料を導入し、加工後に酸化させることによりバリア層を形成する金属内部酸化法は、長尺線の加工の観点から有利と考えられる。そこで今回バリア層として Ni(O)を用いたバリア線材を作製し、その組織や J_c 特性について調査を行った。

2. 実験方法

前駆体粉としては Bi2212 仮焼粉と $\text{Ca}_2\text{CuO}_3 + \text{CuO}$ 粉を混合する 2 粉末法により、Bi:Pb:Sr:Ca:Cu=1.8:0.3:1.87:2.0:2.6 の平均組成を持つ 2P 前駆体粉を作製した。また同様の組成比を持つ Bi2223 粉を 2P 前駆体粉に 2~10wt% 添加・混合した 3P 前駆体粉も作製した。シース材には Ag-2wt%Cu 合金を使用し、前述の前駆体粉を用いて 7 芯および 19 芯の超電導テープを作製した。バリア層は、多芯化する前の単芯線表面に 10~20 μm の Ni 金属層を形成し、本焼時に酸化させることで形成した。完成したテープの相構成や微細組織は走査型電子顕微鏡(SEM-EDX)および XRD を用いて評価した。また臨界電流密度 J_c は直流 4 端子法、電界基準 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ にて評価した。

3. 結果及び考察

Fig. 1 に、作製した NiO バリア入り 7 芯線材の前駆体中の Bi2223 の添加量が、1 次焼結後の Bi2223 相の生成率に及ぼす影響を評価した結果を示す。縦軸の Bi2223 相生成率は XRD の結果より、Bi2212 相と Bi2223 相のピーク強度の比率より評価した。図のように、焼結時間が 10 時間においては Bi2223 添加量の多い試料の方が生成率は高くなっており、30 時間以上では添加率 2%以下のバリア線を除き、どの試料でも Bi2223 相の生成率は 90%以上となり、前駆体中の Bi2223 量の違いによる差はほとんど無かった。ただしバリア無し試料と比べると、バリア入り試料の焼結初期における Bi2223 相の生成率は低く、バリアの導入が Bi2223 相の生成反応を抑制していることがわかった。これらの 7 芯バリア線試料の J_c 特性を Fig. 2 に示す。図のように、初期の生成速度が小さかった 2%添加試料の J_c が最も低く、添加量を増すほど J_c が向上する傾向が見られた。ただし J_c 値自体は 10%添加試料で最大 $7.3 \times 10^3 \text{ A}/\text{cm}^2$ 程度であり、また 1 次焼結時間を変えても大きな変化は見られないことがわかった。

この結果を踏まえ、前駆体に Bi2223 を 10wt% 添加して NiO バリア 19 芯線材を作製した。その結果 19 芯でも機械加工後は比較的均一な Ni 層が得られることが確認でき、焼結時間 30h 以上で Bi2223 相の生成率は 90%以上となった。ただし焼結時間が長くなるほど NiO 層の連続性は低下しやすいことがわかった。そこで全焼結時間が 100 時間以内となるように熱処理パターンを検討した結果、Fig. 3 のような比較的連続した

NiO 層が得られ、また J_c も最大で約 $1 \times 10^4 \text{ A}/\text{cm}^2$ が得られた。

4. まとめ

Ag-Cu 合金シースを用い NiO をバリア層とする内部酸化型バリア線材を作製し、Bi2223 相の生成速度、超電導特性等について調査した。その結果、バリア層導入により Bi2223 の生成速度は低下するが、前駆体への Bi2223 相の添加量により生成速度は向上し、 J_c も高くなる傾向が得られた。10wt% 添加した前駆体を用いて 19 芯バリア線を作製したところ、連続した NiO バリア層が得られ、 $1 \times 10^4 \text{ A}/\text{cm}^2$ の J_c が得られた。

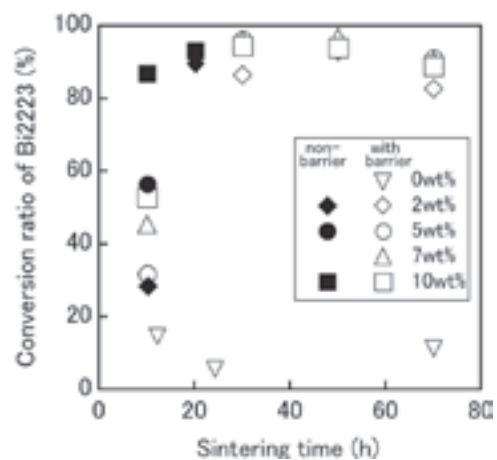


Fig. 1 Effect of Bi2223 contents in precursor on the conversion ratio of Bi2223 phase after 1st sintering.

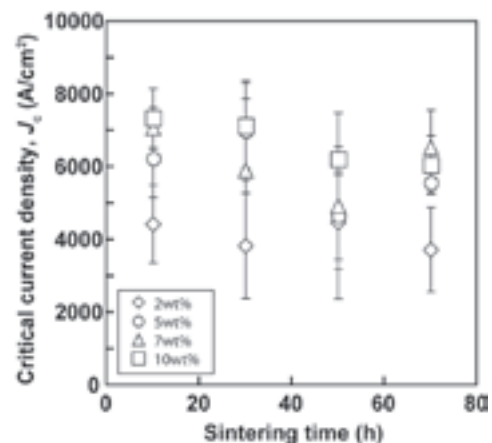


Fig. 2 J_c values of 7-filamentary tapes with NiO barrier.

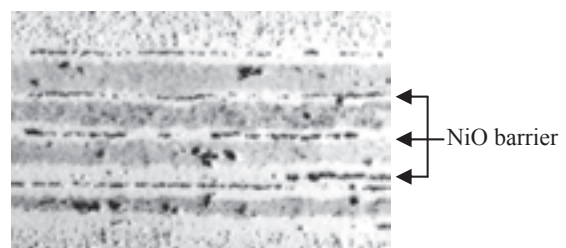


Fig. 3 Longitudinal cross section of 19-filamentary tape with NiO barrier after sintering of 90h totally.

ツイスト加工が Ag-Cu 合金シース Bi2223 テープの J_c 特性におよぼす影響

Influence of twisting on the critical current density of Bi2223 tapes sheathed with Ag-Cu alloy

来原 央, 町田 智弘, 成定 利明, 稲田 亮史, 中村 雄一, 太田 昭男(豊橋技術科学大学)

KURIHARA Chikasa, MACHIDA Tomohiro, NARISADA Tosiaki, INADA Ryoji, NAKAMURA Yuichi, OTA Akio (TUT)

E-mail: c-kurihara@super.eee.tut.ac.jp

1. はじめに

銀シース Bi2223 超電導テープを交流機器へ応用する際に、線材内で発生する交流損失の大幅な低減が重要な課題となっている。外部変動磁界による磁化損失低減にはフィラメント間の電磁結合の抑制が必要である。その方法として、フィラメント間への高抵抗バリアの導入と、フィラメントツイストの導入がある。しかし、ツイスト加工を施すことで超電導テープの J_c 値が低下することが報告されている。そこで本実験では、ツイスト加工を施した超電導テープを作製し、フィラメントツイストが J_c へ与える影響について調査した。

2. 実験方法

本実験に用いた前駆体粉は、Bi2212粉と $\text{Ca}_2\text{CuO}_3 + \text{CuO}$ 粉を混合する2粉末法により作製し、それに Bi2223 相を 2wt%, 5wt%, 7wt% の3通りで添加したものを用意した。シース材には前熱処理を施した Ag-Cu 合金を使用し、PIT法によりツイストを施さないテープと、圧延前の ϕ 1.63mm の丸線においてツイストピッチを 2mm, 3mm, 5mm とした19芯テープを作製した。完成したテープの臨界電流密度 J_c は直流4端子法、液体窒素中、電界基準 $1[\mu\text{V}/\text{cm}]$ にて評価した。また、微細組織および相構成は、走査型電子顕微鏡 (SEM-EDX) およびXRDを用いて評価した。

3. 結果及び考察

Fig.1 にツイストを施したテープのシース材をエッチングで落とした後の表面を示す。Fig.1 から Ag-Cu 合金シースでも均一なツイスト加工が施されていることが分かる。写真より最終テープのツイストピッチは、圧延前に比べると約3倍となっていた。Fig.2にBi2223相を2wt%添加した前駆体粉を用いたテープの断面SEM像を示す。Fig.2から、ツイストピッチの違いで断面組織には大きな違いは見られず、XRDの結果からも Bi2223 相の生成速度に大きな違いは見られなかった。また、前駆体中の Bi2223 相の添加量にかかわらずツイストを施していないテープの J_c は 14~15A であったが、ツイストを施すことで J_c が低下した。ツイストしたテープの J_c とツイストをしていないテープの J_c の比率を Fig.3 に示す。ツイストピッチが短いサンプルほどツイストを施していないサンプルの J_c に対する低下が大きい傾向がある。また同一前駆体粉を使用したサンプルを比較したとき、Bi2223相の添加量が2wt%のサンプルでは、ツイストピッチが5mmから2mmで J_c が単調に約17%低下したのに対し、Bi2223相添加量が5wt%, 7wt%のサンプルではばらつきはあるものの J_c 低下は小さかった。過去の研究で、前駆体粉中の

Bi2223相添加量によりBi2223相の粒径が変化し、添加量を多くするほど粒径が小さくなることが報告されている[1]。Bi2223相の添加量が2wt%のサンプルで J_c がツイストピッチの変化に影響されやすい理由として、完成テープでの粒径が大きい方がフィラメントツイストによる配向性の乱れの受けやすいことが考えられる。

参考文献

[1]. Y.Nakamura, N.Torii, R.Inada and A.Oota, Supercond. Sci. Technol. 21 (2008) 035001.

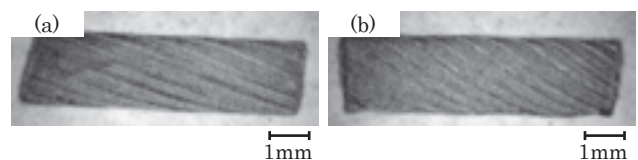


Fig.1 The surface image of twist tapes with the twist pitch of (a)5mm and (b)3mm before rolling.

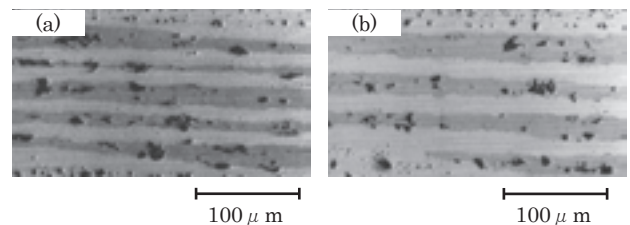


Fig.2 SEM images of the longitudinal section of the final tapes with the twist pitch of (a)5mm and (b)3mm before rolling.

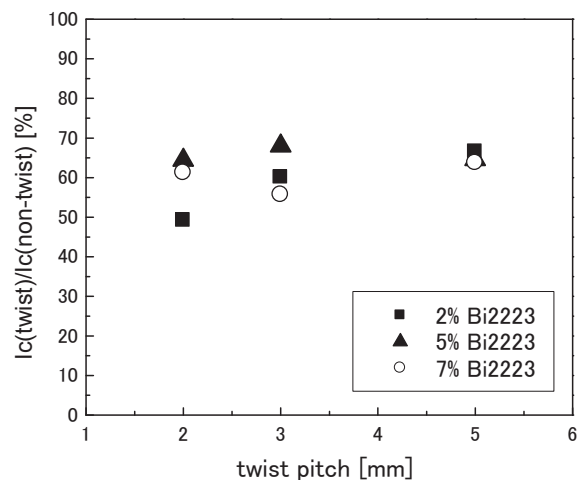


Fig.3 The J_c values of twist tapes normalized by those non-twist tapes with different Bi2223 contents in precursor.

低交流損失Bi-2223超電導線の開発(4)

—ツイストピッチ効果の検討—

Development of low AC loss Bi2223 superconducting wire (4)

— Effects of twisting —

笹重有伺, 柳田治寛, 岩熊成卓, 船木和夫(九大); 綾井直樹, 石田友信(住友電工); 福本祐介, 上條弘貴(鉄道総研)
 SASASHIGE Yuji, YANAGITA Haruo, IWAKUMA Masataka, FUNAKI Kazuo(Kyushu Univ.);
 AYAI Naoki, ISHIDA Tomonobu(Sumitomo Electric Industries); FUKUMOTO Yusuke, KAMIJO Hiroki(Railway Tech. Res. Institute)
 E-mail:sasasige@sc.kyushu-u.ac.jp

1.はじめに

我々のグループは、軽量化のための最適設計、巻線構造や冷却システムの検討などを通して、鉄道車両用主変圧器のBi-2223系超電導線による超電導化の可能性について検討しており、実現のための課題となる超電導線材の交流損失の低減を行ってきた[1]。

本報告では、前回の試作線材[1]に比べ、ツイストピッチをさらに小さくした線材の交流損失特性を計測し、これまでに測定してきた一連の線材の損失特性との比較・検討を行う。特に、ツイストが交流損失特性(ヒステリシス損失や交流損失の周波数依存性)に及ぼす影響について詳細に議論する。

2.低交流損失線材の試作

低損失化のため、ツイストピッチを短くした線材(AC88-C)を試作した。主な諸元をTable 1に示す。AC88-Cのツイストピッチは3.0mmである。Table 1には、前回の試作線材(AC74-A, AC74-C)の諸元についても比較のために示した。

3.測定方法

試作した低交流損失線材の垂直磁界損失を、鞍型ピックアップコイル法により液体窒素中で測定した。積層枚数を6とし、周波数は0.1~60Hzの範囲、磁界振幅は0.25Tまでの領域で損失測定を行っている。

4.測定結果

3種類の試料について、ヒステリシス損失が主要な成分となる低周波数領域(0.1 Hz)での垂直磁界損失(単位体積、1周期あたり)を外部磁界振幅に対してFig. 1に示す。これらの試料の損失特性を大振幅領域で比較すると、ツイストピッチが小さくなるほど損失が減少していることがわかる。フィラメント構造や平均的な臨界電流密度がほぼ同等の多芯線において、このような損失特性の比較により、得られた損失をフィラメント単独のヒステリシス損失として解釈することは困難であることがわかる。磁界振幅0.2Tにおいて、AC74-Aの損失に対するAC74-CとAC88-Cの損失の比をとってみると、0.65, 0.46となり、それぞれ、対応するツイストピッチの比0.61, 0.38にほぼ等しい。このことは、フィラメント同士が結合しているin-situ Nb₃Sn多芯線において観測されたツイスト効果と同様の要因が介在していることを示唆している[2]。

次に、AC88-Cについて、前報[1]において示した手法により、交流損失の周波数依存性から結合時定数を算出した。その結果を前回の試料のものと合わせてTable 1に示す。この場合も、AC74-Aを基準に結合時定数の比を取ってみると、AC74-Cについては0.40となりツイストピッチの比の2乗0.37にほぼ等しく(前回報告)、損失の周波数依存性は、多芯線の結合損失と同様にツイストにより抑制されている。一方、AC88-Cについてはその抑制効果が多少低下していることが分かった。

本研究の一部は国土交通省の補助を受けて実施している。

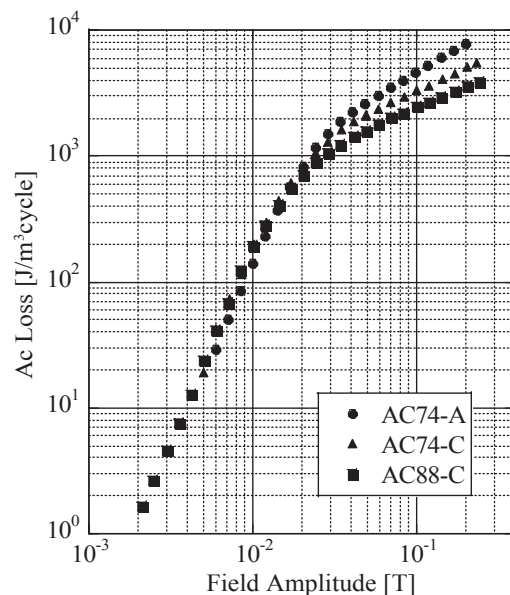


Fig. 1 Field amplitude dependence of ac losses (AC74-A, AC74-C, AC88-C, 0.1Hz)

参考文献

- Y. Sasashige et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.77 (2007) p. 65.
- A. Braginski et al.: IEEE Trans. on Magn., Vol. MAG-17 (1981) p. 243

Table 1 Parameters of Bi-2223 multifilamentary tapes

Parameter	AC74-A	AC74-C	AC88-C
Width (mm)	2.39	2.32	2.2
Thickness (mm)	0.183	0.182	0.17
Number of filament	37	37	37
J_c (kA/m ²) at s.f. and 77K	1.18×10^5	1.08×10^5	1.02×10^5
Twist pitch (mm)*	8.5	5.2	3.2
Coupling time constant(s)	18.6×10^{-3}	7.5×10^{-3}	3.9×10^{-3}
Ac loss(0.1Hz, 0.2T, J/m ³ cycle)	7.79×10^3	5.08×10^3	3.61×10^3

* Twist pitches were measured by an advanced method with uncertainty of 0.2 mm.

銅合金をラミネートした DI-BSCCO[®]線材の機械特性

Mechanical Behavior of 3ply-DI-BSCCO superconducting wires with Cu alloy lamination

長部 吾郎, 綾井 直樹, 藤上 純, 山崎 浩平, 菊地 昌志(住友電工); 長村 光造(応研); 北條 正樹, 大澤 健太(京都大学)
 OSABE Goro, AYAI Naoki, FUJIKAMI Jun, YAMAZAKI Kouhei, KIKUCHI Masashi (SEI);
 OSAMURA Kozo (RIAS); HOJO Masaki, OSAWA Kenta (Kyoto Univ.)
 E-mail: osabe-goro@sei.co.jp

1. はじめに

銀シース Bi2223 超電導テープは高磁界マグネット送電ケーブルへの適用のために、機械強度の改善が求められている。半田接合でステンレス鋼をラミネートした Bi2223 線 DI-BSCCO[®] Type HT は従来の線材と比べて耐力力・歪み特性が飛躍的に向上しており、上記課題を克服する高磁界マグネットとして有望と考えられている。また補強材としてステンレス鋼と同程度の機械強度を保つ銅合金が使用できれば、補強材の比抵抗を大幅に減少することが期待でき、接続抵抗が低減できるようになるため応用上有望な補強材と考えられる。本実験では、ステンレス鋼および2種類の銅合金でラミネートした DI-BSCCO[®] Type HT の機械特性を測定した。

2. 試料および実験方法

Bi 線材の諸元を Table.1 に示す。測定には Ic180A(77K) を保持する DI-BSCCO[®] Type HT テープにステンレス (0.02mm²) をラミネートした3層テープ SUS 補強線、および2種類の異なる銅合金 1 (0.05mm²)、銅合金 2 (0.05mm²) をそれぞれラミネートした3層テープ銅合金補強線の3種類を用いた。Fig.1 にラミネートされた銅合金補強線 DI-BSCCO[®] Type HT の外観を示す。

室温及び液体窒素温度での引張試験、室温での許容曲げ直径を調べ、機械特性を評価した。

Table.1 Specifications and characteristics of measured Bi superconducting wires.

Reinforcer		Type HT		
		SUS304 0.02mm ²	Cu Alloy 1 0.05mm ²	Cu Alloy 2 0.05mm ²
Average Width	mm	4.4	4.3	4.3
Average Thickness	mm	0.292	0.343	0.356
Ic (77K)	A	193	184	204
Je (77K)	kA/cm ²	15	12	13



Fig.1 DI-BSCCO[®] Type HT with 0.05mm² Copper Alloy.

3. 実験結果

Fig.2 に DI-BSCCO[®] Type HT テープに銅合金 1(0.05mm²)、をラミネートした 3 層テープ銅合金補強線の臨界電流特性を示す。1kmにわたって 170A(77K)の Ic を示している。Fig.3 に室温における臨界電流の曲げ直径依存性を示す。0.05mm² 銅合金補強線 1、2 において、許容曲げ直径 39mm、33mm と 0.02mm² SUS 補強線の場合とほぼ同程度の許容曲げ直径を得た。得られた結果を Table.2 にまとめた。これらの結果より、0.05mm² 銅合金補強線 DI-BSCCO[®] Type HT は 0.02mm² SUS 補強と同程度あるいはそれ以上の機械特性を持つことが示さ

れた。またこれら銅合金を用いることにより Table.2 に示すように補強材の比抵抗を 100 分の1程度に押さえることができる。

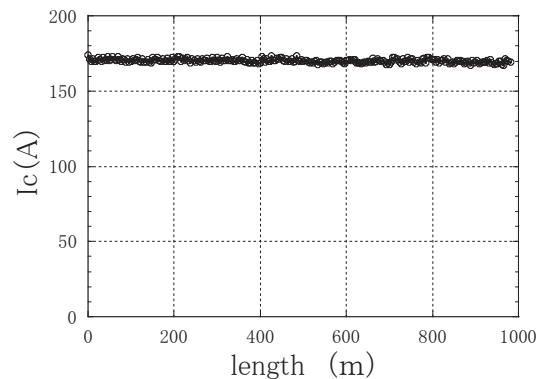


Fig.2 Ic distribution in the longitudinal direction of long length wires of DI-BSCCO[®] Type HT with 0.05 mm² Copper Alloy at 77K.

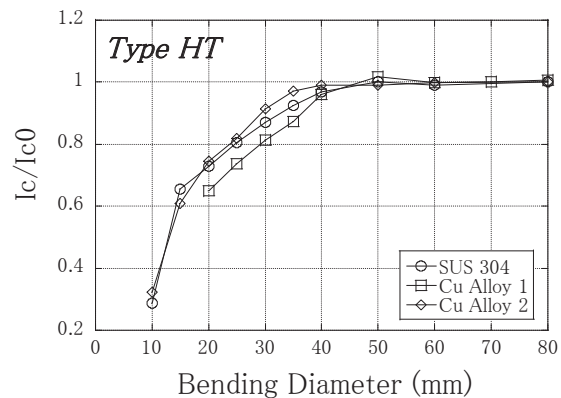


Fig.3 Ic/Ic₀ dependence of bending diameter of the DI-BSCCO[®] Type HT with 0.02 mm² SUS and 0.05 mm².

Table.2 Mechanical Behavior of Type HT superconducting wires with Cu alloy lamination.

Reinforcer		Type HT		
		SUS304 0.02mm ²	Cu Alloy 1 0.05mm ²	Cu Alloy 2 0.05mm ²
Critical Bending Diameter* (RT)	mm	38	39	33
Critical Tensile Strength* (RT)	MPa	212	226	258
Critical Tensile Strength* (77K)	MPa	295	271	345
Resistivity 77K	nΩ·m	700	9	7

*95% Ic Retention

等温部分溶融法により作製した Bi2212 丸線の臨界電流特性 (2)

-Bi2212 コアの不均一性の影響-

Critical current characteristics of Bi2212 round wires prepared by isothermal partial melting method (2) -Influence of the inhomogeneity of Bi2212 cores-

高橋 健一郎, 中根 茂行, 松本 明善, 熊倉 浩明, 北口 仁 (NIMS)

TAKAHASHI Kenichiro, NAKANE Takayuki, MATSUMOTO Akiyoshi, KUMAKURA Hiroaki, KITAGUCHI Hitoshi (NIMS);

E-mail : TAKAHASHI.Kenichiro@nims.go.jp

1. はじめに

Bi₂Sr₂CaCu₂O₈ (Bi2212) 線材は、一般に部分溶融 - 徐冷法で作製される。また、その臨界電流密度 J_c 特性は、熱処理時の最高温度に敏感であり、特に丸線では最適温度条件を 1 K 以下の精度で精密にコントロールする必要がある事が近年明らかになっている[1]。線材の長尺化やコイルの熱処理を考えた場合、そのような非常に精密な温度コントロールを必要とするプロセスを適用する事は困難であり、容易に高特性な線材を作製可能とする技術が求められている。そこで、我々は熱処理時に制御するパラメータとして、温度よりも容易に制御が可能で大型化にも対応し易い、雰囲気中の酸素分圧に注目し、一定温度に保持した電気炉中の酸素分圧を熱処理時に増加させる方法(等温部分溶融法[2,3])による Bi2212 丸線の作製を試みてきた。前回の学会では、熱処理時の保持温度と酸素分圧の変化速度が J_c 特性に及ぼす影響を調べ、酸素分圧の変化速度を緩やかにすることで、更なる高特性化の可能性がある事が明らかになった。そこで、本研究では、酸素分圧の変化速度をより緩やかにして作製した線材を作製しその評価を行ったので報告する。

2. 試料の作製

熱処理は窒素雰囲気中で開始し、ある保持温度に達してから 30 分後に酸素分圧を徐々に増加させた。酸素分圧は電気炉内に導入するガスの全流量は 100 cc/min. で一定とし、その中の窒素ガスと酸素ガスの割合をマスフローコントローラで制御することにより変化させた。今回は、窒素雰囲気から 48 時間かけて酸素雰囲気へ変化させた場合(保持時間は 60 時間)と、12 時間かけて酸素雰囲気へと変化させた場合(保持時間は 24 時間)の二種類の条件で熱処理を行った。また、保持温度は 835 - 865°C の範囲で種々変化させた。

3. 結果と考察

図 1 に、4.2 K, 10 T における J_c の熱処理温度依存性を示す。48 時間で酸素へと置換する条件で作製した線材は、12 時間で置換した場合と比較して一桁程度 J_c が向上し、 6×10^4 A/cm² 程度の J_c を持つ試料が得られた。図 2 に、保持温度 850°C で熱処理した線材の、AC 帯磁率(実部)の温度依存性を示す。12 時間置換の線材では二段転移が見られ、線材内部に高 T_c 相と低 T_c 相が分布している事が分かった。また、12 時間置換の線材では、X 線マイクロディフракトメータを用いた測定からも、線材の径方向について Bi2212 相の格子定数に分布があることが観測されている。48 時間置換の線材では、僅かに低 T_c 相が見られるがその割合は大幅に減少しており、この線材内部の不均一性が改善された事が J_c 特性の向上に寄与した可能性が考えられる。今後、熱処理条件等の最適化を行い、線材内部の均一性を向上させる事により、更なる特性向上が期待出来る事が分かった。

参考文献

- [1] A. Matsumoto *et al.*, SuST. **17** (2004) 989.
 [2] T.G. Holesinger *et al.*, APL. **63** (1993) 982.
 [3] R. Funahashi *et al.*, Physica C **311** (1999) 107.

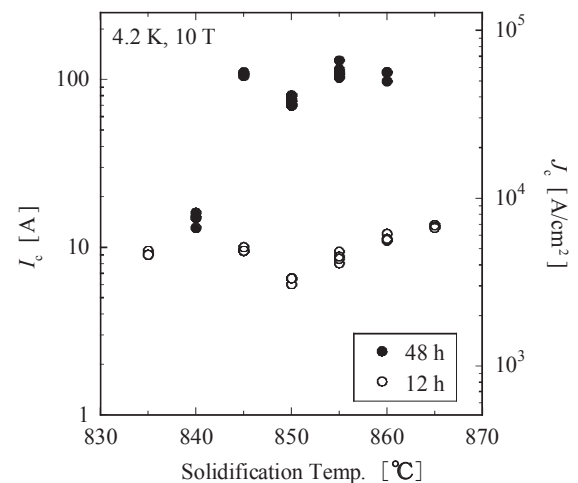


Fig. 1 J_c values at 10 T and 4.2 K for the wires heat-treated at various temperatures.

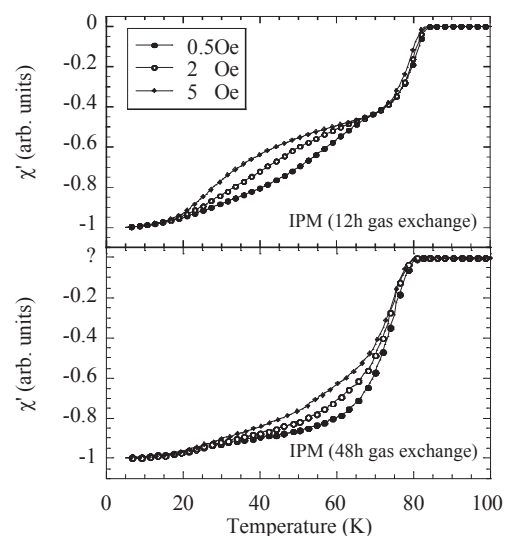


Fig.2 Comparison of the temperature dependences of AC susceptibility (real part).

補強した Bi-2223 テープ導体の高磁場中の臨界電流

Critical currents of reinforced Bi-2223 tape conductors in high magnetic fields

長谷隆司, 財津享司, 濱田 衛 (神戸製鋼); 崔 世鎔, 木吉 司 (NIMS)

HASE Takashi, ZAITSU Kyoji, HAMADA Mamoru (Kobe Steel, Ltd.),

CHOI Seyong, KIYOSHI Tsukasa (National Institute for Materials Science)

E-mail : hase.takashi@kobelco.com

1. はじめに

Bi-2223 テープ線材を 4.2 K に冷却することにより、金属系超電導線材のみでは実現が困難と考えられる 1.05 GHz (24.7 T) の NMR マグネットなどへの応用が期待される。これまでに、温度 4.2 K において Bi-2223 テープ線材の臨界電流を 30 T までの外部磁場中で測定し、その高いポテンシャルを示すことができた[1]。しかし、この測定は、テープ線材にかかる電磁応力を緩和するために、Cu 板をテープ線材に沿わせて半田で一体化した状態で行われたため、実際のコイル中線材の状態を模擬した評価ではなかった。そこで今回は、ステンレスや真鍮などの補強材とテープ線材を半田で一体化して成形した Bi-2223 導体を用意し、実際のコイル中の導体を模擬した状態で、28 T までの磁場中における臨界電流を測定した。その結果について報告する。

2. 実験方法

加圧焼成 (Controlled Over Pressure, CT-OP) 法によって製造された Bi-2223 テープ線材 1 枚を厚さ 30 μm の 2 枚のステンレス製テープで挟んだ断面構造 (幅 2.71 mm \times 厚さ 0.24 mm) の導体 #1 と、Bi-2223 テープ線材 2 枚を厚さ 50 μm の 2 枚の真鍮製テープで挟んだ断面構造 (幅 2.70 mm \times 厚さ 0.52 mm) を有する導体 #2 の二種類の Bi-2223 導体を用意した。これらの導体から長さ 30 mm の各サンプルを切り出し、外部磁場を導体テープ面に平行に印加するサンプル (以下、B \parallel と表記) と、外部磁場をテープ面に垂直に印加するサンプル (以下、B \perp と表記) に分けて、4.2 K における臨界電流の測定を行った。全ての臨界電流測定は四端子法によって行い、電界基準には 100 $\mu\text{V}/\text{m}$ を用いた。

3. 実験結果

ステンレス補強導体 #1 と真鍮補強導体 #2 の臨界電流の外部磁場依存性をそれぞれ Fig. 1 と Fig. 2 に示す。補強材を含まない Bi-2223 テープ線材の測定では、25 T 以上の磁場領域で、励磁時に比べて減磁時の臨界電流が低下するという、通常とは上下関係が逆転したヒステリシスが観察されたが[1]、Fig. 1 ではそのようなヒステリシスは見られない。また、Fig. 2 では B \perp のみにそのヒステリシスが見られた。ステンレス補強導体 #1 の B \parallel と B \perp のサンプルで、28 T においてそれぞれ 199 A と 122 A の臨界電流が得られた。これらの臨界電流を導体の

全断面積で除したオーバーオール臨界電流密度は、307 A/ mm^2 と 187 A/ mm^2 である。真鍮補強導体 #2 の B \parallel と B \perp のサンプルでは、28 T においてそれぞれ 383 A と 203 A の臨界電流が得られ、オーバーオール臨界電流密度として 273 A/ mm^2 と 145 A/ mm^2 が得られた。導体 #1 および #2 共に、導体テープ面に外部磁場が平行な場合には、目標の 200 A/ mm^2 を上回る値が 28 T で得られることがわかった。

謝辞

この開発は、独立行政法人科学技術振興機構の先端計測分析技術・機器開発事業による成果である。

参考文献

[1] T. Hase, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.11.

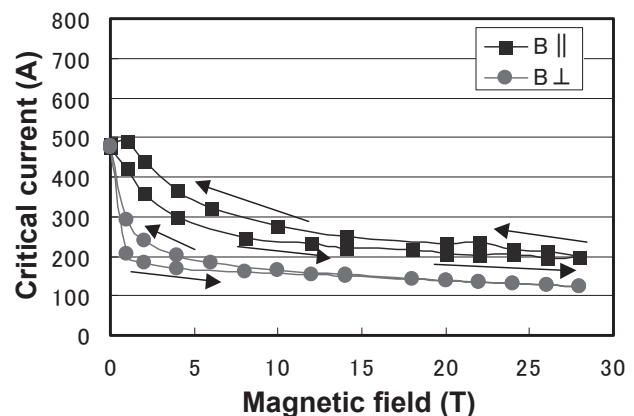


Fig. 1 Magnetic field dependence of critical currents for Bi-2223 conductor #1.

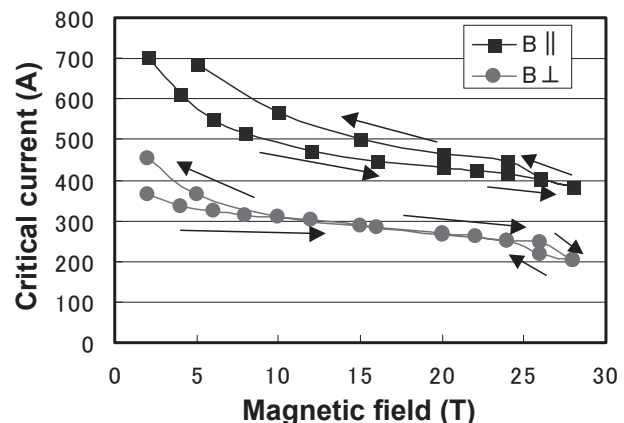


Fig. 2 Magnetic field dependence of critical currents for Bi-2223 conductor #2.

希薄 RE ドープによる Bi(Pb)2223 の臨界電流特性の改善 Improvement of critical current properties of Bi(Pb)2223 by dilute RE doping

滝本 孝太, 下山 淳一, 影島 慶明, 荻野 拓, 堀井 滋, 岸尾 光二 (東大院工)

TAKIMO TOKota, SHIMOYAMA Jun-ichi, KAGESHIMA Yoshiaki, OGINO Hiraku, HORII Shigeru, KISHIO Koji (Univ. of Tokyo)

E-mail: tt076692@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

Bi系超伝導線材はすでに様々な用途で実用・試用されているが、その応用範囲の拡大には磁場下における臨界電流特性の改善が不可欠である。我々は銅酸化物超伝導体に対する普遍的に有効な臨界電流特性改善手法として、希薄ドープ法を見出し、これまで RE123 の熔融凝固バルクや単結晶 [1] および Bi(Pb)2212 単結晶 [2,3] でそれを実証してきた。さらに最近、Bi(Pb)2223 焼結体においても Sr サイトに 0.5% 程度の Nd ドープにより臨界電流特性が向上することを見出した [4]。特に 20~50 K における不可逆磁場 (H_{irr}) の改善は Bi(Pb)2223 線材の応用可能領域が大きく広がる可能性を示唆している。そこで本研究では Bi(Pb)2223 焼結体に対して様々な軽希土類元素の希薄ドープを行い RE 元素およびそのドープ量の最適化を行い、さらに単芯線材化や磁場配向プロセスによって希薄 RE ドープした *c* 軸配向 Bi(Pb)2223 焼結体の作製を試みた。

2. 実験方法

仕込組成を $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.35}(\text{Sr}_{1-x}\text{RE}_x)_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ ($x=0$: RE = Nd, $x=0.002, 0.005, 0.01$; Pr, $x=0.002, 0.004, 0.006, 0.008$; La, $x=0.002, 0.005, 0.01$) とした Bi2223 焼結体を、両端を封じた銀パイプ中において固相反応法により作製した。焼成条件は 95%Ar / 5%O₂ 雰囲気下で 830°C、300 h であり、99%Ar / 1%O₂ 雰囲気下で 700°C、100 h アニール後、空气中 830°C で 200 h 再焼成した。酸素量は空气中 300~830°C でアニール後急冷、または 400°C、 $P_{\text{O}_2} = 40$ atm でアニール後炉冷することにより制御した。試料の構成相は粉末 X 線回折法により超伝導特性は SQUID 磁束計で評価し、磁化ヒステリシス曲線の幅から拡張 Bean モデルにより J_c を計算した。

3. 結果と考察

希薄 RE ドープによって Bi(Pb)2223 相の生成温度がやや高くなる傾向にあったが、弱還元雰囲気下での焼成によって全ての組成においてほぼ単相の Bi(Pb)2223 焼結体試料が得られた。再焼成後の Bi(Pb)2223 焼結体試料の T_c は 110~114 K であり、RE の種類によらずドープ量 x の増加に伴って T_c が系統的に低下する傾向が認められた。再焼成後 500°C 空气中でアニール、急冷した La, Pr ドープ試料の 20 K における臨界電流特性を Fig. 1 に示す。La や Pr をドープした試料においても Nd ドープ試料同様に J_c , H_{irr} が改善しており、RE 置換領域近傍が有効なピンニングセンターとなることが示唆された。また、磁場中での J_c の改善は 0.5% 程度の RE ドープ量のと

きに最も顕著で、これは RE ドープ Bi(Pb)2212 単結晶における最適濃度とはほぼ同じである。

当日は線材化や磁場配向プロセスによって作製した *c* 軸配向 Bi(Pb)2223 焼結体における希薄 RE ドープ効果についても報告する。

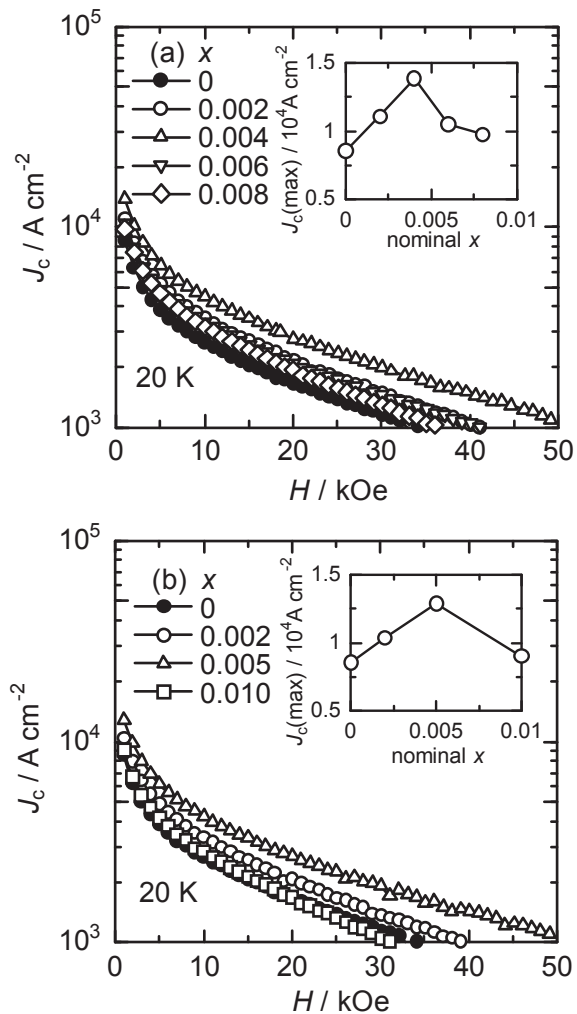


Fig. 1 Critical current properties of undoped and RE-doped $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.35}(\text{Sr}_{1-x}\text{RE}_x)_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ bulks at 20 K; (a) RE = Pr; (b) RE = La.

参考文献

- [1] Y. Ishii *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **89** (2006) 202513.
- [2] M. Shigemori *et al.*, *Physica C* **408-410** (2004) 40-41.
- [3] S. Uchida *et al.*, *J. Phys.(conf. series)* **43** (2006) 231-234.
- [4] K. Takimoto *et al.*, *Abstracts of CSJ Conference 77* (2007) 7.

溝状人工ピンニングセンターを導入した超伝導 Nb 膜における磁束密度分布の観察

Magneto-optical observation of the distribution of the magnetic flux density in superconducting Nb films with groove-type artificial pinning centers

何 継方, 原田 直幸, 内藤 裕志, 浅田 裕法 (山口大); 石橋 隆幸 (長岡技科大)

HE Jifang, HARADA Naoyuki, NAITOU Hiroshi, ASADA Hironori (Yamaguchi Univ.); ISHIBASHI Takayuki (Nagaoka Univ. of Tech.)
E-mail : jifanghe@yamaguchi-u.ac.jp

1. はじめに

混合状態にある超伝導体の磁束密度分布を直接観察する手段として MO (Magneto-optical) イメージング法が注目を集めている。これまで、微細加工により超伝導 Nb 膜に断面が溝状の対称な人工ピンとステップ溝状の非対称な人工ピンを導入し、MO イメージング法を用いて、3.6K における磁束の出入りの観察を行い、磁束密度分布の観察に MO イメージング法が有効であることを確認した。

本報告では、測定温度を変化させ、パターンが異なる溝状人工ピンを導入した Nb 膜における磁束密度分布を MO イメージング法を用いて、詳しく観察した結果について述べる。

2. 実験方法

人工ピンは、電子ビーム蒸着法でサファイア(1102)基板の上に成膜した厚さが $0.5 \mu\text{m}$ の Nb 膜に、フォトリソグラフィ技術を用いて $5.0 \mu\text{m}$ の加工周期で導入した。Fig.1(A)、Fig.2(A)、Fig.3(A)はそれぞれ対称な溝状人工ピン、非対称なステップ溝状人工ピン、ループ状となる人工ピンを導入した Nb 膜の模式図を示す。ループ状人工ピンの加工領域は $0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ 、その他は $0.5\text{mm} \times 1.0\text{mm}$ である。

試料表面の磁束密度分布の MO 観察は、Pt 反射膜を蒸着した厚さ $0.8 \mu\text{m}$ の $\text{Y}_2\text{BiFe}_5\text{O}_{12}$ ガーネット膜を Nb 膜の上に密着させた後、低温磁気光学顕微鏡を用いて行った^[1]。ここでは、ゼロ磁場において測定温度まで冷却を行った後 (ZFC: zero-field-cooled) に試料表面に垂直に磁場を印加して増加させ、その後減少させた。測定温度は 3.8K、4.3K、5.0K に設定した。

3. 実験結果と考察

Fig.1(B)-(F)は Fig.1(A)に示す対称な溝状人工ピンを導入した Nb 膜の 3.8K における MO 観察結果を示す。これらの図の左右が長さ方向、上下が幅方向である。明るい部分ほど磁束密度が高いことに対応している。外部磁場が低い場合、試料の上下の端に最も明るく、排除された磁束が集中していることが分かった。印加磁場の増加にしたがって、白のドメインは試料の中央に向かって広がるのが観察され、磁束が試料の内部に侵入していくのが分かった。Fig.1(D)に示す試料のほぼ中央にある黒のドメインは磁束密度が最も低く、磁束が侵入していない部分である。次に、磁場を減少させると、試料の端から磁束が先に排除され、Fig.1(E)、(F)に示すように、Fig.1(D)に示す磁束密度が最も低い黒のドメインは外部磁場が減少していくことにより、周囲よりも磁束密度が高くなり、白のドメインに反転した。

Fig.2(B)-(F)は Fig.2(A)に示す非対称なステップ溝状人工ピンを導入した Nb 膜の 4.3K における MO 観察結果を示す。磁場を減少させた場合、Fig.2(D)に示す磁束密度が最も低い黒のドメインは Fig.2(E)、(F)に示す磁束密度が周囲よりも高くなり、白のドメインに反転し、ドメインの位置が試料の中央から下方方向にシフトしていることが分かった。このことは、導入した人工ピンの非対称性によるものと考えられる。

Fig.3(B)-(F)は Fig.3(A)に示すループ状の溝状人工ピンを導入した Nb 膜の 5.0K における MO 観察結果を示す。外部磁場が低い場合、Fig.3(B)に示す試料の上下の端に最も明る

く、排除された磁束が集中していることが分かった。また、磁場を増加にしたがって、Fig.3(C)、(D)に示すように、磁束が試料の表面に存在する傷に沿って内部に侵入していく様子を観察できた。さらに、磁場を増加させた後、減少させると、Fig.3(E)、(F)から、磁束は試料の端部分から排除され、磁束密度が高い部分が試料の中心部と対角線に沿って存在することが観察された。

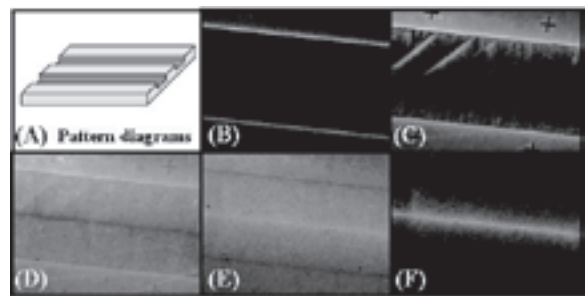


Fig.1 Magneto-optical images of the specimen with symmetric groove-type APC for ZFC at 3.8K and the external field $B_a =$ (B) 1.0mT, (C) 4.7mT, (D) 15.3mT and (E) 12.4mT (reduced from 37.9mT), (F) 1.7mT.

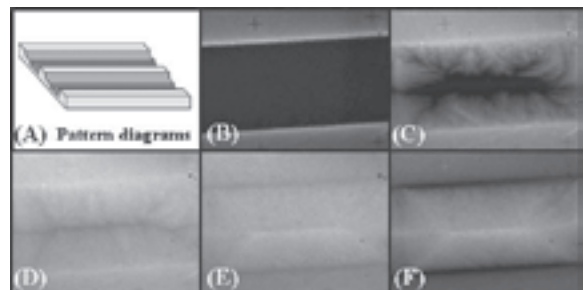


Fig.2 Magneto-optical images of the specimen with asymmetric step-groove-type APC for ZFC at 4.3K and the external field $B_a =$ (B) 1.1mT, (C) 16.1mT, (D) 40.4mT and (E) 24.3mT (reduced from 40.4mT), (F) 13.0mT.

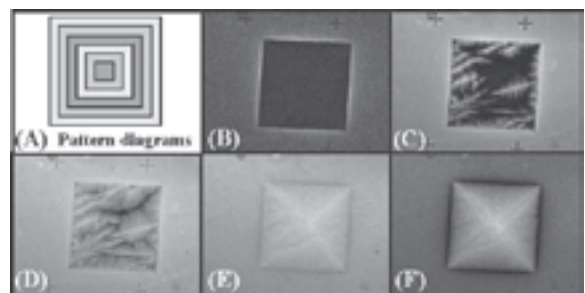


Fig.3 Magneto-optical images of the specimen with loop step-groove-type APC for ZFC at 5.0K and the external field $B_a =$ (B) 1.0mT, (C) 4.7mT, (D) 10.1mT and (E) 12.5mT (reduced from 38.2mT), (F) 13.5mT.

参考文献

[1] J. He, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.193

残留歪が異なるNb₃Sn線材のB_{c2}に及ぼす歪効果

Strain effect of B_{c2} for Nb₃Sn wires under various residual strain conditions

小黒英俊, 淡路智, 西島元, 渡辺和雄(東北大金研)

OGURO Hidetoshi AWAJI Satoshi, NISHIJIMA Gen, WATANABE Kazuo (IMR, Tohoku Univ.),
E-mail: h-oguro@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

我々は、Nb₃Sn 線材の超伝導特性と歪との関係を正確に説明するために、3次元歪に注目して研究を行っている。3次元歪を簡単に扱うため、偏差歪モデルを用いた解析を行い、偏差歪(形状変化を表す量)でNb₃Sn線材の超伝導特性を表すことを試みてきた[1]。前回の講演で、Nb₃Sn線材の引張り歪印加時のB_{c2}と軸方向歪、横方向歪の測定を行った。その結果から、偏差歪とB_{c2}の関係を考えると、偏差歪に加えて静水圧歪を考えることで、Nb₃Sn線材の超伝導特性を正確に表現できる可能性があることを示した[2]。

今回は、前回の発表の結果に加えて、線材に事前曲げ処理を与えたもの、線材の断面構造が異なるものに関して、低温強磁場下においてB_{c2}の引張り歪依存性を測定した。この結果から、B_{c2}と3次元歪との関係について考察した。

2. 実験方法

CuNb 補強ブロンズ法 Nb₃Sn 超伝導線材を用いて、引張り歪印加時の超伝導特性(B_{c2})を測定した。このとき、事前曲げ処理を行うことで、残留歪の大きさを変えた線材のB_{c2}も測定し、残留歪以外の条件が全て同じNb₃Sn線材の特性を評価した。事前曲げ処理は線材をプリーに通巢ことで、0.8%の曲げ歪を10回与えた。

この試料に関して、低温、強磁場下において線材に引張り歪を与えた状態で、4端子法によって電気抵抗測定を測定してB_{c2}を求めた。このとき、ひずみゲージを線材に直接貼り、歪を測定している。ひずみゲージは、線材の軸方向と横方向の2方向に対して貼付けて、2方向の歪を測定した。

3. 結果と考察

Fig. 1 に、熱処理直後と事前曲げ処理した CuNb/Nb₃Sn に対する B_{c2} と横方向歪の軸方向引張り歪依存性の測定結果を示す。この図から、B_{c2} が最大値となるときの引張り歪の値が事前曲げ処理によって小さくなり、そのときの B_{c2} の最大値が向上しているのが分かる。横方向歪に関しては、熱処理直後と事前曲げ処理後で、軸方向歪依存性の振る舞いは変わらないことが分かった。

軸方向と横方向の歪の測定結果から、3次元歪を考えた。解析には ten Haken らの用いた偏差歪(Deviatoric strain ε_{dev})モデルを用い[3]、偏差歪と B_{c2} との関係を表すことから始めた。偏差歪は

$$\varepsilon_{\text{dev}} = \frac{2}{3} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 - (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 - (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2}$$

で表され、体積変化を無視したときの変形量を示す。このとき、B_{c2} が最大となるときに偏差歪が最小になるように、横方向歪を補正する。このようにして計算された偏差歪と B_{c2} との関係を図 2 に示す。この関係から、同じ偏差歪の状態でも B_{c2} が異なることが分かる。ここで、静水圧歪の効果を見ると、この変化の違いを説明できる可能性がある。Nb₃Sn フィラメントの B_{c2} は、単結晶と同様に、圧力が大きくなる、つまり静水圧歪が大きくなると B_{c2} が小さくなることは、実験的に確かめているが、その詳細は断面構成の異なる線材の結果と合わせて当日報告

する。

本研究は科学研究費補助金(特別研究員奨励費)の援助を受けました。

参考文献

- [1] H. Oguro *et al.*, *J. Appl. Phys.* **101** (2007) 103913
- [2] H. Oguro *et al.*, *Abstract of. CSJ Conference, Vol 77* (2007) 1C-a04
- [3] B. ten Haken *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **5** (1995) 1909-1912

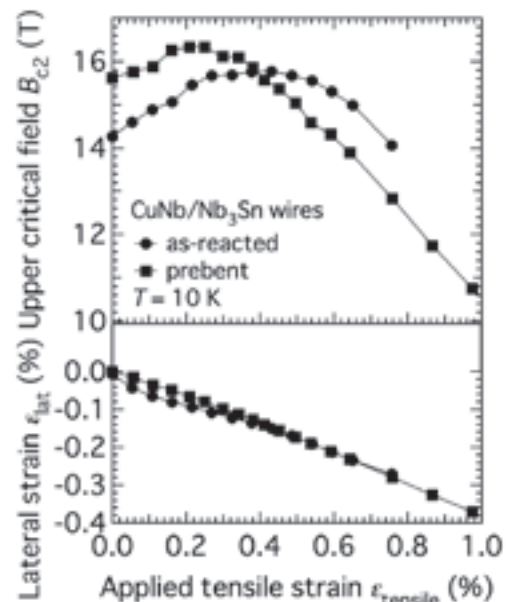


Fig. 1 Upper critical field at 10 K and lateral strain as a function of the applied tensile strain for as-reacted and prebent CuNb/Nb₃Sn wires.

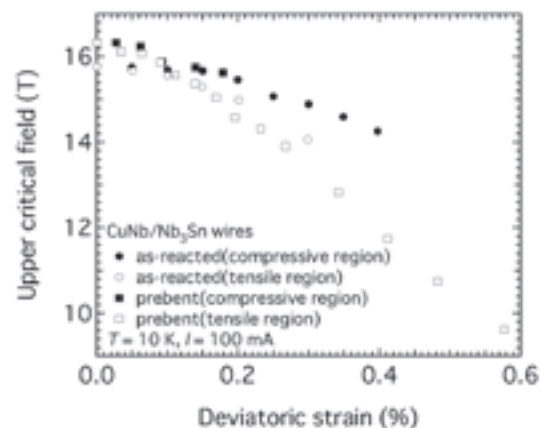


Fig. 2 Deviatoric strain dependence of B_{c2} for as-reacted and prebent CuNb/Nb₃Sn wires at 10 K.

RHQT 法 Nb₃Al 単芯 JR 法線材の超伝導特性

Superconducting properties of RHQT Nb₃Al single wire made by JR method

物質・材料研究機構 飯嶋安男、菊池章弘、伴野信哉、竹内孝夫

Y. Iijima, A. Kikuchi, N. Banno and T. Takeuchi

National Institute for Material Science, Japan

E-mail : IIJIMA.Yasuo@nims.go.jp

【1】はじめに

Nb/Al の拡散対距離が長い場合、RHQ 処理の加熱時間を長くすれば Al 厚の厚い RIT 線材でも高 J_c 化が期待できると考え、RHQ 処理の通電電極間隔を 10 から 30cm へ長くすることで RIT 法線材の J_c-B 特性を改善することが出来た。しかしながら、Al 厚の薄い JR 多芯線材の場合、従来の RHQ 条件が適していたためか通電電極間隔を長くしても超伝導特性に大きな変化は見られなかった。

本報告では Nb マトリックスへの Al の拡散を防ぎ RHQ 処理条件の影響を単純化するためおよび Al 層厚の厚い JR 線材で高 J_c 化が図れないか検討するために、Ta マトリックス JR 単芯線材を前駆体線材にして RHQ 処理を行った結果について報告する。

【2】実験方法

日立電線(株)製の JR 法 Ta マトリックス単芯前駆体線材を図 1 に示す。線径は 0.53mm、Ta マトリックス比 0.6、Al 厚約 600nm、白く見える部分が Ta 部、黒く見える部分が JR 部である。

RHQ 処理は、通電電極間隔:30cm、線材移動速度:0.33、0.40、0.50、0.67、1.00m/s の5条件行った。そのときの加熱時間はそれぞれ 0.90、0.75、0.60、0.45、0.30s である。電圧設定(到達温度範囲)は直接 A15 相が出来る条件から過飽和 bcc 固溶体領域までの範囲を狙って行った。

A15 相への変態熱処理は一般的な 800°C-10hr の熱処理を 800°C まで 1hr で昇温、10hr 保持、炉冷して実施した。

超伝導特性は 4 端子抵抗法で測定した。T_c は抵抗遷移の midpoint の温度とし、I_c は電圧が 1μV/cm の電流値とした。JR 法線

材の I_c 測定は線材保護のためのシャント抵抗を使用して行った。試料の組織観察には、光学顕微鏡、SEM 等を用いた。

【3】実験結果

直接 A15 が生成する領域と過飽和 bcc が生成する領域の境界は、線径が 1.35mm で Al 厚の薄い JR 多芯線材の場合、加熱時間を変化させても供給エネルギーが 4.75J/mm³ で大きな違いはなかったが、線径が細く Al 厚の厚い本実験の線材では、加熱時間が 0.6s 以下の場合、供給エネルギーを 4.5 J/mm³ まで下げても過飽和 bcc が生成した。電極間距離が 30cm で線径が 0.73mm の RIT 多芯線材の境界が 4.5 J/mm³ であることから、まだ直接 A15 が生成する領域に入っていないと思われ、加熱時間ではなく急冷速度(線材移動速度)が影響したことが考えられる。

図2に各線材移動速度で得られた最高の T_c と RHQ 処理の加熱時間との関係を示す。加熱時間を長くしていくと T_c は向上し 0.75s でピークをとり、さらに 0.9s まで長くすると低下する。ピークの T_c は 17.87K が得られており、Al 厚の薄い JR 多芯線材と同等の値である。

最高の core-J_c は、加熱時間が 0.75s のとき 21T で 180 A/mm² が得られた。Al 厚の薄い JR 多芯線材と同等の J_c 特性が、厚い Al 厚の線材で得られたことは、前駆体線材作製時の加工度を下げられるので線材設計が容易になる可能性がある。その他の詳細は当日報告する。また、RHQ 線材に減面加工を施すと J_c-B 特性が向上することが知られているが実験の都合で次回報告したい。

本研究の一部は文部科学省の原子力試験委託費から助成を受けて実施されたものである。

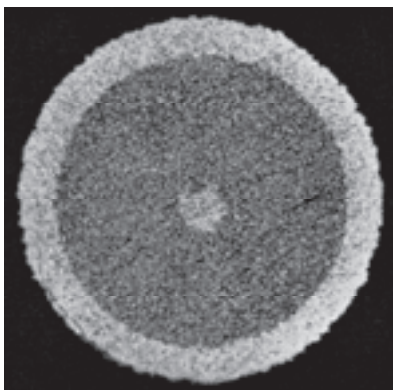


Fig.1 Cross-sectional photograph of the Ta matrix precursor wire made by JR method.

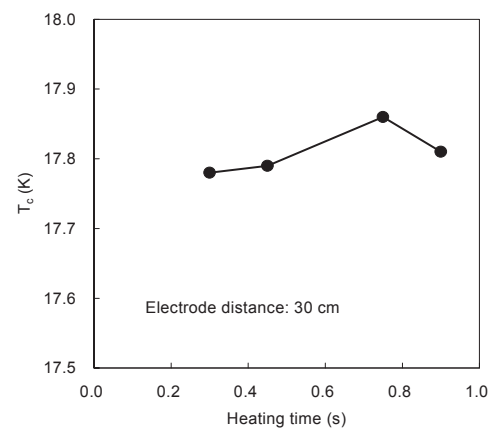


Fig.2 T_c versus heating time curves of the RHQT-Nb₃Al wire.

低銅比 Nb₃Al 線材の特性Characteristics of Cu Stabilized Nb₃Al Strands with Low Cu Ratio

菊池章弘 (NIMS); 山田隆治 (Fermilab); Emanuela Barzi (Fermilab); 佐々木憲一 (KEK); 中川和彦 (日立電線); 小林道雄 (ヒキフネ); 竹内孝夫 (NIMS); Zlobin Alexander (Fermilab); 土屋清澄 (KEK); 中本建志 (KEK); 山本明 (KEK)
 KIKUCHI Akihiro (NIMS); YAMADA Ryuji (Fermilab); BARZI Emanuela (Fermilab); SASAKI Ken-ichi (KEK);
 NAKAGAWA Kazuhiko (Hitachi Cable); KOBAYASHI Michio (Hikifune); TAKEUCHI Takao (NIMS);
 ALEXANDER Zlobin (Fermilab); TSUCHIYA Kiyozumi (KEK); NAKAMOTO Tatsushi (KEK); YAMAMOTO Akira (KEK)
 E-mail: KIKUCHI.Akihiro@nims.go.jp

1. はじめに

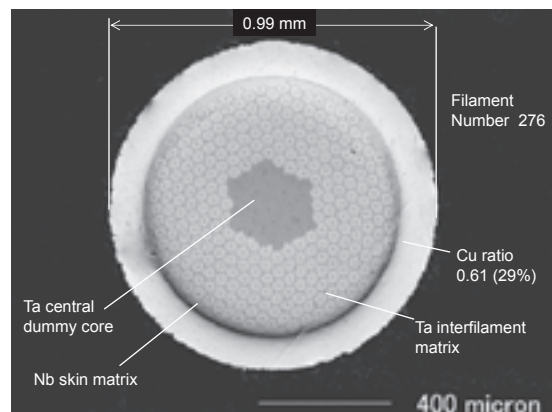
1980年代に米国 NIST の J. W. Ekin により各種 A15 型化合物超電導体の J_c の歪み依存性が比較されて以来、Nb₃Al の優れた耐歪み特性は広く認知されている。一方で歪みに弱い Nb₃Sn 線材では内部 Sn 拡散法の改良により J_c が着々と向上し、最近では 2,500-3,000 A/mm² (4.2K, 12T) の高い non Cu J_c も目新しい報告ではなくなっている。歪みに弱いとされながらも、950MHz-NMR の内層コイルに応用されたり、また、数 m 長のレーストラック磁石が試作されているのも事実である。

ところが、最近の内部 Sn 拡散法 Nb₃Sn 線材には歪み以外の大きな弱点がある。加速器用磁石で使用されるラザフォード型ケーブルでは、ケーブル加工により素線は大きなダメージを受け、特にケーブルのエッジ部では曲げ・ねじり・圧縮等が融合した複雑な変形になる。これによりフィラメント形状は崩され、さらに物理的にフィラメントが結合して大きな結合損失の引き金となっている。さらにバリアが破損するため、熱処理時に Sn が安定化銅を汚染して RRR の低下を招き、場合によっては溶融した Sn が吹き出して線材が破裂する (Sn バースト) 事故も生じている。数十～数百台もの磁石性能の歩留まりを考えると、現状の高い J_c の内部 Sn 拡散法 Nb₃Sn 線材が Nb-Ti 線材に置き換わるとはにわかに信じがたい。RHQT 法 Nb₃Al 線材は、ケーブル加工によるダメージ (性能劣化) が少なく、当然、前述した Sn バーストによる事故はあり得ない。これは、耐歪み特性に勝るとも劣らない Nb₃Al 線材の利点であり、現実的な大量生産にとっては最も意味ある特徴と言えるだろう。

近年、連続イオンプレーティング及び高速電解めっき技術の開発により、長尺 RHQT 法 Nb₃Al 線材への安定化銅の複合が実用的なレベルで可能になり、実用化の期待が益々高まっている。更なる non Cu J_c の向上が望まれるが、決定的な改善指針が明らかでなく、当面の基礎的研究が必要である。一方で、銅比を減らせば線材全体の J_c の向上は容易に得られる。磁石がクエンチした場合、そのエネルギーを磁石で吸収する場合には高い銅比は不可欠である。ただし、エネルギーが小さい場合や磁石本体以外で吸収できる場合には銅比を減らせる余地がでてくる。今回、低銅比の線材を試作して、4.2 K における臨界電流及び低磁場での磁氣的安定性について評価した。また、28 本撚りラザフォードケーブルも試作した。

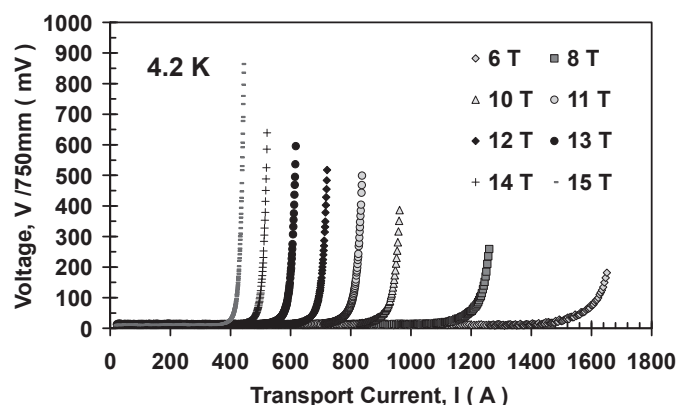
2. 線材の断面構造

Fig. 1 に、今回製造した F4 線材の断面写真及びいくつかのパラメータを示した。線径は 0.99mm、銅比は 0.61 である。267 本の Nb₃Al フィラメントは Ta バリアで分割している。Ta バリアは 4.2K の低磁場におけるフィラメント結合を切り、フラックスジャンプや磁化異常を抑制する。安定化銅と接する外皮マトリクスは、安定化銅との密着性が良好な Nb を採用している。

Fig. 1 Cu stabilized Nb₃Al strand (F4)

3. V-I 曲線

銅比が 0.61 と従来 (1.0) よりもかなり低いにもかかわらず、6 T 以下の低磁場でも、不安定化による急激な電圧上昇 (クエンチ) は発生せず、通常の超電導-常伝導転移曲線が得られた。Fig. 2 は測定結果の一例である。

Fig. 2 V-I curves (4.2 K) of F4-Nb₃Al strand

リスタックNb₃Al線材の作製とI_c特性Fabrication and transport properties of re-stack Nb₃Al wire

田中 和英、中川 和彦、田川 浩平（日立電線）；
伴野 信哉、竹内 孝夫、飯嶋 安男、菊池 章弘（物材機構）

TANAKA Kazuhide, NAKAGAWA Kazuhiko, TAGAWA Kohei (Hitachi cable);
BANNO Nobuya, TAKEUCHI Takao, IJIMA Yasuo, KIKUCHI Akihiko (NIMS)

E-mail: tanaka.kazuhide@hitachi-cable.co.jp

1. はじめに

我々はこれまで、Nb₃Alシングル線を複数本組込んで一次多芯線を作製し、これを急熱急冷(RHQ)処理した後に、二次多芯線として安定化Cuに充填、複合化する「リスタックNb₃Al線材」の検討を行ってきた[1]。

この線材は、急冷後のNb (Al) 過飽和固溶体の状態で、Cu安定化材を外部に付与するために、線材に強加工を施している。この強加工により、Nb (Al) 過飽和固溶体相中に、高密度の転位等による高いひずみエネルギーを蓄積することが可能となる。また、フィラメントの縮径化も実現できることから、高J_c化に有望な新規構造の線材として期待される。

本報では、低放射化材料のTaをマトリックス材としたリスタックNb₃Al線材の長尺加工性と、得られた線材のI_c特性を評価した結果について報告する。

2. 実験方法

NbシートとAlシートを共巻きしたジェリーロール/Nb₃Al前駆体を用いて一次多芯線(84芯)を作製した。これをφ1.38まで伸線後、RHQ処理することにより、Nb/(Nb-Al)過飽和固溶体線材とした。得られた線材を六角形状に伸線した後、Cu管に18本組込み、二次多芯線(リスタック線)とした。これを共引き伸線することにより、最終的に減面加工率で約99%のφ1.0まで伸線した。

Table 1に一次多芯線及びリスタック線の諸元を示す。リスタック線の最終的なフィラメント径は14μmと見積もられ、特徴の一つであるフィラメントの縮径化が実現できた。得られたリスタック線材の典型的な横断面をFig. 1(a)に示す。比較のため、丸形状のNb/(Nb-Al)過飽和固溶体線材を55本組込んだ場合についてもFig. 1(b)に示す。六角形状の線材を組込むことで、断面形状の乱れは大幅に低減できた。

A15相への変態熱処理は、800°C、10時間(真空中)で実施した。I_cの測定は、4端子抵抗法を用いて液体ヘリウム中で行い、I_cは1μV/cmの電界基準で定義した。J_cは、I_cを断面内のCu以外の面積で除することにより求めた。

3. 結果及び考察

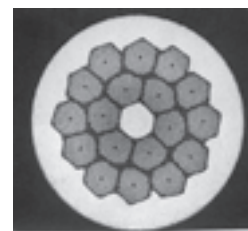
Fig. 2にφ1.0まで伸線したリスタック線のJ_c-B特性を示す。比較のために、(i)リスタック前の一次多芯線、(ii)RHQ後に73%の加工度で伸線した線材、(iii)RHQ後にCuクラッド加工を施した平角線のJ_cについても併せて示す。本研究で作製したリスタック線は、4.2K, 20T中で230A/mm²、15T中で900A/mm²のJ_cが得られ、RHQ後に加工を実施した従来材と比較しても同等以上の性能を有することがわかった。

断面をSEMで観察した結果、結晶組織が微細化されていることを確認した。これは、高密度の転位等が導入されたことを示唆するものであり、従来材よりも中磁場領域のJ_c向上が顕著になった主因と考えられる。

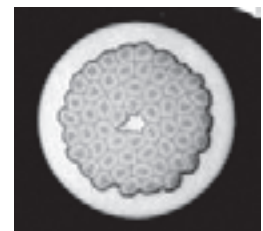
以上のことから、RHQ後に塑性加工するリスタック線は、高J_c化に有効であることを確認できた。リスタック線材の減面率とJ_cの関係、ならびにJ_cの線径依存性については当日報告する。

Table 1 Specifications of the precursor wires.

	First stack	Second stack (Re-stack)
Wire diameter (mm)	1.38	1.0
Number of filament	84	84×18
Filament diameter (μm)	113	14
Matrix ratio to filament	0.8	—
Cu/non-Cu ratio	—	0.99



(a) built-in hexagonal wire



(b) built-in round wire

Fig.1 A typical cross sectional view of the precursor wires.

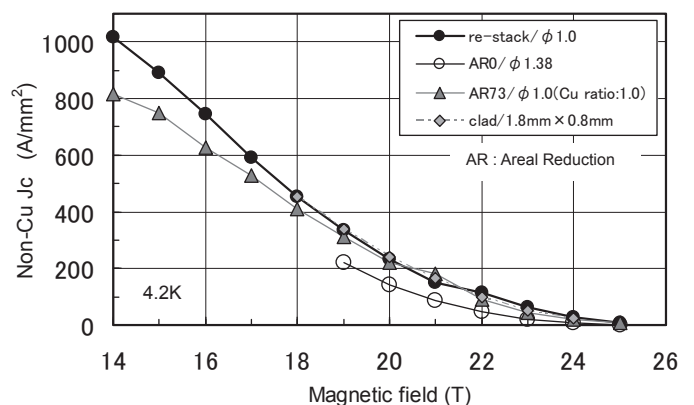


Fig. 2 Magnetic field dependence of J_c measured for various Nb₃Al wires.

参考文献

[1]N. Banno, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.76 (2007) P.187

高 Ga 基化合物 PIT 法を用いた V_3Ga 超伝導線材における Mg 添加効果Effect of Mg addition on the V_3Ga superconducting wire through high Ga content compound PIT method

菱沼 良光 (NIFS), 菊池 章弘, 飯嶋 安男, 竹内 孝夫 (NIMS), 西村 新 (NIFS), 谷口 博康, 朝永 満男 (大阪合金工業所)
 HISHINUMA Yoshimitsu (NIFS), KIKUCHI Akihiro, IJIMA Yasuo, TAKEUCHI Takao (NIMS), NISHIMURA Arata (NIFS),
 TANIGUCHI Hiroyasu, TOMONAGA Mitsuo (OAW Co., Ltd),

E-mail: hishinuma.yoshimitsu@nifs.ac.jp

1. はじめに

我々は、 V_3Ga 超伝導線材を「低放射化高磁場超伝導線材」と位置づけて将来の実用核融合炉超伝導線材として再検討するとともに、超伝導特性向上を目的に前駆体における高 Ga 濃度化を考案し、高 Ga 濃度 Cu-Ga 化合物を用いた単芯及び多芯線材を試作し、超伝導特性向上の可能性を明らかにしてきた[1,2,3]。

本研究では、更なる超伝導特性の向上を目的に微量 Mg 添加を試みた。過去にブロンズ法における Mg 添加効果について報告があるが[4]、本製法における超伝導特性及び微細組織への Mg 添加効果について調査した。

2. 実験方法

本研究における Mg 添加は Cu-Ga 化合物系での最適 Ga 濃度である Cu-50at%Ga 粉末へ行った[2,3]。Mg 添加量は 0.5, 1.0, 5.0at%とし、添加原料は金属 Mg 粒とした。化合物粉末はタンマン溶解にて作製し、Cu と Ga を先に溶解し、その後 Mg を溶解した。その際、酸化を防止するために高純度 Ar ガス雰囲気で行った。作製したインゴットは溶体化処理を施し、乳鉢で粉砕して化合物粉末を得た。作製した粉末を V 金属管 (ID:4.0mm-OD:8.0mm) に充填し、約 1.0mm の線径まで線引加工を行って単芯前駆体を得た。19本の単芯前駆体を、V 金属管 (ID:4.0mm-OD:8.0mm) にスタックし、この複合体を 1.04mm の線径まで再度線引加工を行った。作製した 19 芯線材を真空中で種々の熱処理を行った。

熱処理後の試料について、NIMS 強磁場センターの 18T 汎用超伝導マグネットとハイブリッドマグネットを用いた I_c -B 特性及び H_{c2} 特性で評価した。 J_c 値は I_c 値を生成した全拡散相断面積で除した Layer J_c とした。また、SEM 及び EPMA を用いた微細組織観察と組成の定量分析測定を行った。

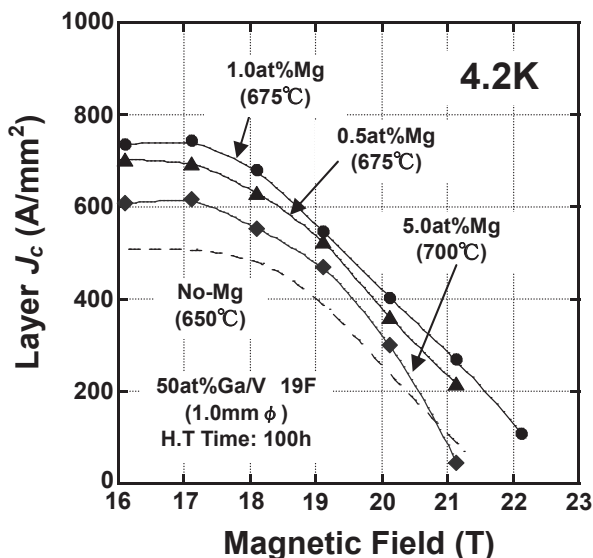


Fig.1 Effect of Mg addition on the J_c -B properties of the V_3Ga multifilamentary wires using Cu-50at%Ga compound

3. 実験結果

Fig.1 に J_c -B 特性における Mg 添加効果を示す。Mg 添加によって、無添加試料と比較して最適熱処理温度が高温側にシフトする傾向が見られた。この傾向は製法が違うブロンズ法でも見られた現象である。また、Mg 添加によって J_c -B 特性が向上し、1.0at%添加で最大の特性を示し、 J_c 特性における Mg 添加量依存性が示唆された。ブロンズ法においても同様に微量添加で良好な特性が得られ、 V_3Ga 超伝導体における Mg の微量添加効果が確認された。Fig.2 に 1.0at%Mg 添加試料における V_3Ga 拡散層の元素分布を示す。生成した拡散相は V_3Ga 単相であった。特徴的に、 V_3Ga 拡散相中の Ga 濃度勾配が観測され、一方、拡散相中には明瞭な Cu と Mg の存在は確認されなかった。当日は、 V_3Ga 超伝導相の微細組織と超伝導特性の関連について報告する。

謝辞

本研究は NIFS 運営交付金(NIFS07UCFF005-2)、NIFS 一般共同研究(NIFS07KKMF003)、文科省科学研究費補助金(若手研究(B)#18760643)及び文科省原子力試験研究費により行われた。

参考文献

1. Y. Hishinuma, et al, Supercond. Sci. and Tech., Vol. 20, No.6, (2007), p.569-p.573.
2. Y. Hishinuma et al, Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.188.
3. Y. Hishinuma et al, J. Phy. Conf. Ser.97, (2008), 012131.
4. Y. Tanaka, et. al, J. Japan Inst. Metals (Japanese), Vol.46, issue 4, (1982), p.420-426.

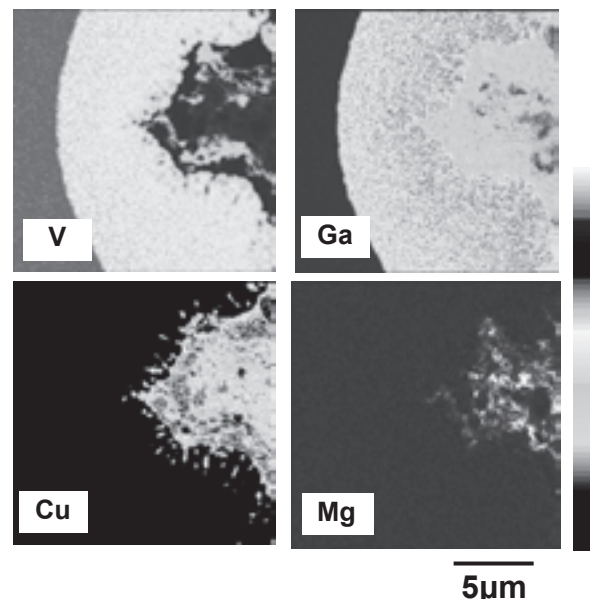


Fig.2 The Typical EPMA mapping on the cross-section of Mg addition V_3Ga diffusion layer (1.0at%Mg-675°C×100h)

高密度 MgB₂バルクの力学特性

Mechanical properties of high density MgB₂ bulk

大橋 徹也, 杠 直哉, 池田 賢一, 波多 聡, 中島 英治 (九州大学)
山本明保, 下山淳一, 堀井滋, 岸尾光二 (東京大学)

OHASHI Tetsuya, YUZURIHA Naoya, IKEDA Ken-ichi, HATA Satoshi, NAKASHIMA Hideharu (Kyushu University)
YAMAMOTO Akiyasu, SHIMOYAMA Jun-ichi, HORII Shigeru, KISHIO Kozo (University of Tokyo)
E-mail: ohashi@mm.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

MgB₂バルク材の実用化のためには、優れた超伝導特性を得るだけでなく、基本的な力学特性に関する知見を得ることも重要である。本研究では、BとMgB₂の混合粉末にMgを拡散反応させる方法¹⁾で作製された高密度MgB₂バルク材について力学特性の評価を行い、力学特性と微細組織の関係を考察した。

2. 試料作製および実験方法

無添加MgB₂バルク材、およびSiCとナフタレン(C₁₀H₈)を共添加したMgB₂バルク材を作製した。無添加材の作製では、MgB₂(粒径約1μm)とアモルファスB(0.3μm)を混合した粉末と、Mg(150μm)粉末をNb管(3.0/2.6mmφ)内で隣り合うように充填した。各粉末の量はモル比でMg:B:MgB₂=1.2:2:0.5とした。Nb管の両端を一軸プレスで封じた後、真空中で800°C-180hの熱処理を施してMgB₂バルク材を得た。SiCとナフタレンの共添加材の作製では、MgB₂+B混合粉末にSiC粉末を加え、Mg粉末、ナフタレンと共にNb管に充填、封入した。各原料の量比はMg:B:MgB₂:SiC:C₁₀H₈=1.2:1.9:0.5:0.05:0.005、熱処理条件は真空中800°C-72hとした。これらのバルク材表面に、エタノールを用いた湿式研磨を施し、ピッカース硬さ試験およびIF(Indentation Fracture)法による破壊靱性値評価を行った。試験条件は、押し込み荷重を2.94N、4.90N、9.80N、19.6N、49.0N、押し込み時間を15secとし、それぞれの荷重で得られた結果の平均値を測定結果とした。

3. 結果および考察

Table 1にピッカース硬さと破壊靱性値の測定結果を示す。SiCとナフタレンを添加することで、ピッカース硬さ、破壊靱性値ともに50%程度向上することが明らかとなった。Fig.1に、押し込み荷重49.0Nでピッカース硬さ試験を行ったときの圧痕周りの光学顕微鏡像を示す。SiCとナフタレンを共添加することで微細なポイドの数が減少することがわかる。このポイドは、未反応Bを主とする領域が優先的に研磨されて形成されたことがTEM観察結果から解釈される。すなわち、MgB₂バルク材の力学特性は、その組織不均一性の影響を強く受けていることが示唆される。

Fig.2に同バルク材と、代表的な超伝導体として知られているNb₃Sn⁽²⁾、YBCO⁽³⁾、DBCO⁽⁴⁾、高圧合成MgB₂バルク材⁽⁵⁾のピッカース硬さを比較した結果を示す。本研究で用いたMgB₂バルク材は、Nb₃Snと同程度のピッカース硬さを有し、YBCO、DBCOと比較すると約3倍~4倍程度の大きさのピッカース硬さであることが明らかとなった。これは、同バルク材が高密度であることに加えて、Fig.3のTEM暗視野像で示すような1μm以下の微細な結晶粒径であることに起因すると考えられる。高圧合成MgB₂バルク材が、2000以上の非常に大きなピッカース硬さを有することも同様の理由であると考えられる。

今後、MgB₂の実用化を目指すためには、更なる破壊靱性値の向上が求められる。脆性材料の破壊靱性を向上させる方法の一つとして、一端入った亀裂を迂回させながら進展させる方法がある。そのためには、高密度を保ったまま、粒界破壊し、かつ亀裂が迂回するような結晶粒径となるように試料を作製することが重要であると考えられる。

Table 1. Mechanical properties of pure MgB₂ bulk and MgB₂ bulk doped with SiC and C₁₀H₈.

Sample	Vickers Hardness	Fracture Toughness [MPa·m ^{1/2}]
Pure MgB ₂ bulk	643.2	4.47
MgB ₂ bulk doped with SiC and C ₁₀ H ₈	925.2	7.76

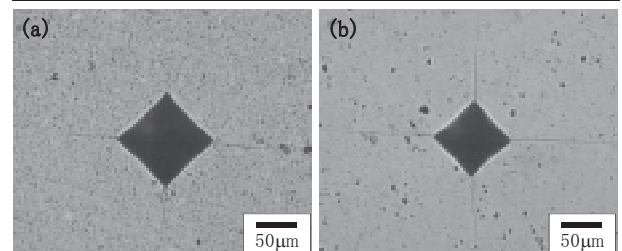


Fig.1. Optical microscope images of Vickers indentations. (a) Pure MgB₂ bulk and (b) MgB₂ bulk doped with SiC and C₁₀H₈.

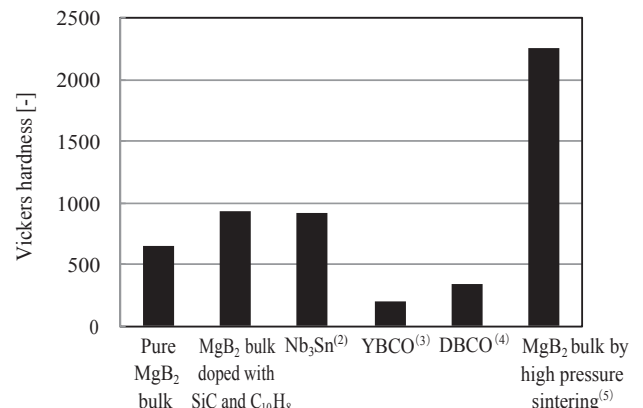


Fig.2. Vickers hardness of various superconductors.

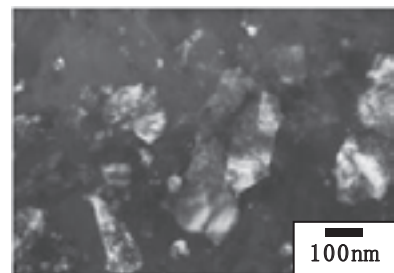


Fig.3. TEM dark-field image of pure MgB₂ bulk.

参考文献

1. I. Iwayama et al.: Physica C Vol.460-462 (2007) p. 581.
2. Y.S.Cho et al.: Materials Science and Engineering Vol.A141 (1991) p.139-148.
3. O. Uzun et al.: Journal of the European Ceramic Society Vol.25 (2005) p.969-977.
4. H.Fujimoto et al.: Physica C Vol.463-465 (2007) p.374-378.
5. Y.Takano et al.: Appl. Phys. Lett. Vol. 78 (2001) p.19.

ex-situ 法による炭素置換 MgB₂ 線材の作製と超伝導特性

Fabrication and superconducting properties in ex-situ processed carbon-substituted MgB₂ tapes

藤井 宏樹, 戸叶 一正, 熊倉 浩明, 小澤 清 (NIMS)

FUJII Hiroki, TOGANO Kazumasa, KUMAKURA Hiroaki, OZAWA Kiyoshi (NIMS)

E-mail: fujii.hiroki@nims.go.jp

1. 序

MgB₂ 線材は原材料費が安価、軽量などの利点があり、Nb-Ti に替わる材料として、あるいは冷凍機冷却下での使用が可能な材料として期待されている。実用化のためには J_c 特性の一層の向上が必要であるが、その一手段として、硼素の炭素置換が挙げられる。置換によって B_{c2} が向上し、高磁界特性の改善が図られる。本研究では炭素置換 MgB₂ 粉を用いて ex-situ 法で線材を作製し、超伝導特性を評価した。

2. 実験

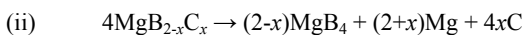
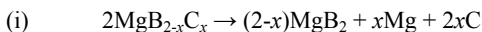
MgB_{2-x}C_x において、 $x=0, 0.05, 0.1$ となるように各原料粉末を秤量混合し、成型した後、Ar ガス雰囲気中、ステンレス管に封入して 700–900°C で 2h 加熱処理した。こうして得られた粉末試料を Fe 管に充填し、線材形状に加工後、Ar ガス気流中 900–950°C で加熱処理した。また、これらの粉末に有機酸性溶液処理を施したもの、及び比較のために市販の MgB₂ 粉 (Alfa Aesar) を用いて線材試料の作製も行った。これらの粉末及び線材試料を評価した。

3. 結果

XRD 測定より、MgB₂ は 700°C で反応生成するが、炭素置換は 800°C では起こらなかった。また、市販品と比較して、自作粉では MgO 含有量が多く、この他少量の MgB₄ も存在していた。

Fig. 1 に各線材の transport J_c @4.2K を示す。溶液未処理粉では、市販品と比べて自作粉の J_c 値はかなり低く、MgO が超伝導電流パスの障害となっているためだと考えられる。一方、溶液処理により、全線材試料で J_c 特性が向上し、その値はほぼ同程度であった。MgO の除去や炭素置換が起こったためだと考えられる。 $x=0.05$ 及び 0.1 の試料では、transport J_c 及び磁化 J_c において、磁界依存性が小さかったが、これは炭素置換によるものと考えられる。

Fig. 2 に磁化曲線を示す。炭素置換線材では $x=0$ と比べて T_c が低下しており、炭素置換が実際に起こっていることが示唆された。また、遷移幅が大きくなっており、これに対応して、交流磁化率の振幅依存性も $x \geq 0.05$ の試料では $x=0$ と比べて大きくなっていった。これらのことから炭素置換 MgB₂ 粉を用いると結晶粒間の弱結合が起こるものと考えられる。Ex-situ 法においては、高い J_c を得るためには線材加工後に加熱処理を行う必要があるが、この高温での焼結反応時に MgB₂ が一部分解するものと考えられる。即ち以下の反応式が考えられる。



炭素置換 MgB₂ 粉の場合、分解によって炭素が析出し、結晶粒間結合を劣化させると考えられる。これにより、 J_c の磁界依存性は低く、高磁界側での J_c 値は若干高いものの、低磁界側での値が低くなる。低温での焼結反応によって、MgB_{2-x}C_x の分解を抑制し、粒間結合の弱結合化を防ぐことが可能であると思われるが、そのためには充填粉の微細化など、活性な粉を用いることが有効であると考えられる。

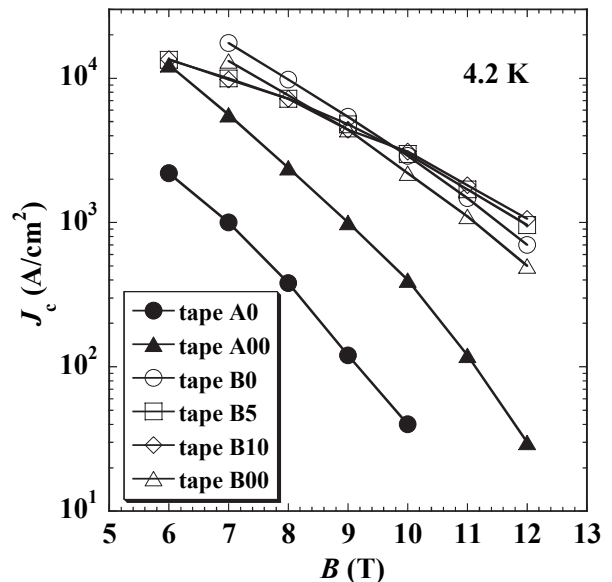


Fig. 1. Transport J_c as a function of magnetic field for the Fe-sheathed MgB₂ tapes A0 (homemade ($x=0$); pristine), A00 (α ; pristine), B0 (homemade ($x=0$); chemically treated), B5 (homemade ($x=0.05$); treated), B10 (homemade ($x=0.1$); treated), B00 (α ; treated). The measurements were carried out at 4.2 K in fields applied parallel to the tape surface.

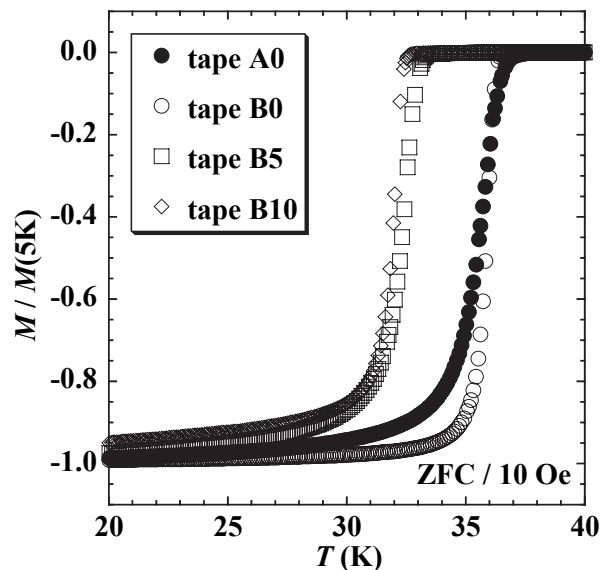


Fig. 2. Temperature dependence of DC magnetization curves of Fe-sheathed MgB₂ tapes. The magnetization M is normalized to that measured at 5 K, $M(5\text{K})$, for each tape. The measurements were carried out in a magnetic field of 10 Oe in the zero-field cooled mode (ZFC).

Ta バリアをもつCuNi シースMgB₂ 多芯線の交流損失AC loss properties of CuNi-sheathed MgB₂ composites with Ta barriers

田中 和英, 船木 和夫, 末吉 貴洋, 笹重 有伺, 柁川 一弘, 岩熊 成卓(九大);
岡田 道哉(日立); 熊倉 浩明(物材機構); 林 秀美(九州電力); 三戸 利行(核融合研)

TANAKA Kazuhide, FUNAKI Kazuo, Sueyoshi Takahiro, SASASHIGE Yuji, KAJIKAWA Kazuhiro,
IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ.); OKADA Michiy a (Hitachi Ltd); KUMAKURA Hiroaki (NIMS);
HAYASHI Hidemi (Kyushu Electric Co., Inc.); MITO Toshiyuki (NIFS)

E-mail: kazuhide.tanaka.je@hitachi.com

1. はじめに

MgB₂超電導体は、金属系超電導体では最も高い39Kの臨界温度を有する。また、比較的簡略な工程で線材化できることから、電流容量の向上ができれば、NbTiの代替材料あるいは冷凍機冷却コイル等の超電導応用が期待できる。我々は、液体水素温度までの温度領域において交流環境下で使用できるMgB₂ 線の開発を目指して、多方面からの特性評価[1],[2]を行ってきた。本報では、低損失化のためにTaバリアCuNi合金シースのMgB₂ 多芯線を作製し、その交流損失特性を評価した結果について報告する。

2. 線材製作と諸元

線材の作製は、in-situ/PIT法により行った。原料粉末は、Mg粉末、アモルファスB粉末である。両者を一度にボールミル混合した後、CuNi(外周)/Ta(内周)複合管に充填した。所望の径まで伸線した後、再度、Fig.1の断面構成となるようにCuNi管に組込み、伸線を行った。そして、最終的に線径1.2mm、長さ約15mの6芯線を得た。作製した線材の主な諸元をTable 1に、横断面をFig.1に示す。コア比は9%、ツイストピッチは50mm である。

3. 実験方法

MgB₂ 多芯線の疎巻コイル状試料の交流損失を国際標準化されているピックアップコイル法により液体ヘリウム中で測定した。MgB₂ 線間の絶縁は、同径の非金属線をFRP製巻枠に共巻きすることにより行った。試料コイル形状やピックアップコイルの配置等は国際標準規格[3]に準拠している。交流磁界は試料コイル軸に平行に印加した。

解析モデルは、多数本のフィラメントで構成される超電導多芯線に対して適用される「多芯線構造モデル」を用いた。

4. 結果及び考察

測定は周波数領域0.1-5Hz、振幅0.01-1Tの範囲で実施した。Fig. 2 に実測と解析結果を示す。実測値は、広い磁界振幅及び広い周波数振幅において、多芯線構造モデルによる解析値ではほぼ定量的に再現できた。これは、前報告したNbバリアCuシース多芯線における、Nbバリアを介した超電導フィラメントの結合による損失が改善できたことを示唆している。フィラメントの細線化やツイストピッチの短縮により、さらに低損失化が可能と考えられる。

Taバリア多芯線、Nbバリア多芯線の実測と解析比較の詳細については、当日報告する。

Table 1 Characteristics of the CuNi sheathed Ta-barrier MgB₂ wire.

	Cu-10%Ni-sheathed Ta-barrier wire
Wire radius r_w	0.60 mm
Volume ratio	MgB ₂ /Cu/Ta/CuNi 0.09/0.06/0.10/0.75
Critical current I_c (0T/1 T, 4.2 K)	95 A / 25 A
Twisting pitch L_p	50 mm
Number of filaments	6
Average filament dia. d_f	0.15 mm
Filament region radius r_{fr}	0.31 mm
Conductivity of sheath σ_m	7.1×10^6 S/m

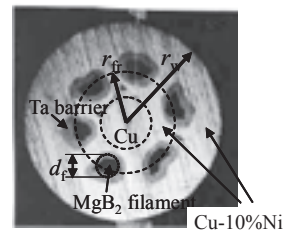


Fig.1 Cross sectional view of the CuNi sheathed Ta-barrier MgB₂ wire.

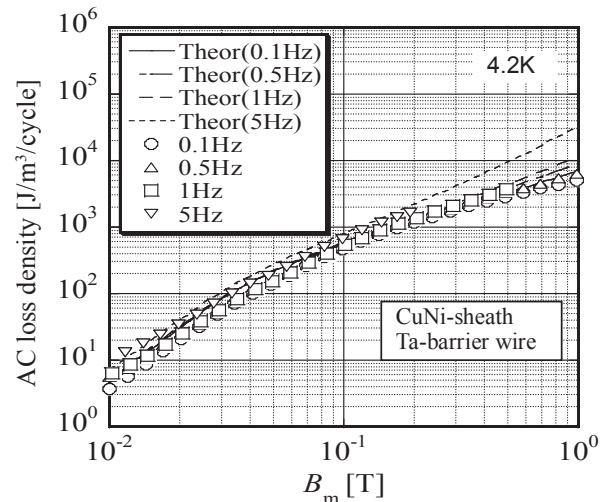


Fig. 2 AC loss properties of the CuNi sheathed Ta-barrier MgB₂ wire.

謝辞

本研究は、科研費基盤研究(A)「電力装置用導体を目指したMgB₂新線材技術開発」(16206032)の支援の下に実施した。

参考文献

- [1]前開登 他:第74 回春季低温工学・超電導学会講演概要集 p.65
- [2]船木和夫 他:第77回秋季低温工学・超電導学会講演概要集 P.58
- [3] IEC617688-8 Superconductivity-Part 8: AC loss measurement a pickup coil method, First edition 2003-4

ニホウ化マグネシウムで作製した高性能永久電流スイッチ

High performance persistent current switch made with MgB₂ wire

A(株)日立・日立研 高橋雅也^A、岡田道哉^A
 B物質・材料研究機構 中根茂行^B、北口 仁^B、熊倉浩明^B

Masaya Takahashi^A、Michiya Okada^A、Takayuki Nakane^B、Hitoshi Kitaguchi^B、Hiroaki Kumakura^B

^AHRL Hitachi Ltd、^BNational Institute for Materials Science

E-mail : masaya.takahashi.pb@hitachi.com

1. はじめに

MgB₂ 超電導体は 39K の臨界温度を有する金属系超電導体であり、NbTi の代替材料として、または冷凍機冷却コイル等への応用が期待されている[1]。この応用の一つとして、MgB₂ の特徴を活かした熱的に安定な永久電流スイッチ(以下、PCS)がある。本研究では、高抵抗 CuNi 合金を金属シースとする MgB₂ 線を用いて PCS を作製、そして NbTi コイルと超電導接続して閉回路を作製し、この回路の永久電流運転(通電電流 1000A 以上)を実施した。

2. 実験方法

Mg 粉末と B 粉末を混合した後、金属管に充填した。金属管の寸法は、外径 18mm、内径 13mm である。その後、伸線加工で直径 1.2mm、長さ 100m の単芯線材を作製した。その線材のうち約 25m を用いて、一定の張力を加えながら無誘導巻線することで、PCS の巻線部を作製した。そして Ar ガス中で 630°C×3hr の熱処理で MgB₂ に反応させ、熱処理後の巻線部を蜜蝋で含浸補強した。次に含浸した巻線部上に直径 0.7mm、長さ 25m のマンガニン線を巻線して、さらに蜜蝋で含浸補強した。最後に MgB₂ 線の線材両端を上方に導き、NbTi 線と超電導接続し、PCS 素子を作製した。Fig.1 に作製した PCS 素子の外観を示す。

Fig.2 に作製した閉回路を示す。回路を安定化させるため、PCS 素子と NbTi コイル間には NbTi 線を引き回し、それぞれと超電導接続した。回路抵抗は通電電流で発生した磁場を NbTi コイルの中心部に設置したホール素子で測定し、その減衰率から算出した。

3. 実験結果

Fig.3 に作製した閉回路の 4.2K、初期電流 1002A 時における電流減衰結果を示す。約 16hr の永久電流運転の結果、接続部 1箇所あたりの接続抵抗が $4.70 \times 10^{-13} \Omega$ となった。これより、この PCS を用いて 1000A 以上の永久電流運転が可能であることがわかった。

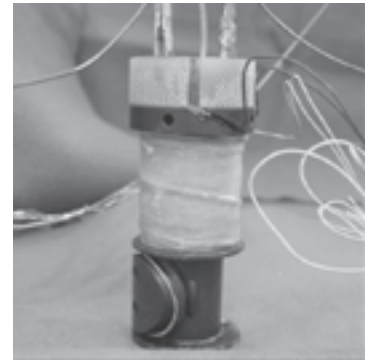
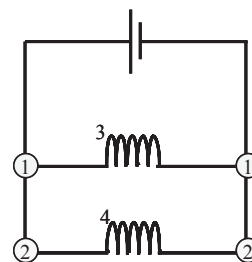


Fig.1 Photograph of the persistent current switch made with MgB₂ wire.



1. NbTi-NbTi-NbTi joint
2. MgB₂-NbTi joint
3. NbTi coil
4. MgB₂ PCS

Fig.2 The closed-loop circuit with a MgB₂ PCS, NbTi coil and superconducting joints.

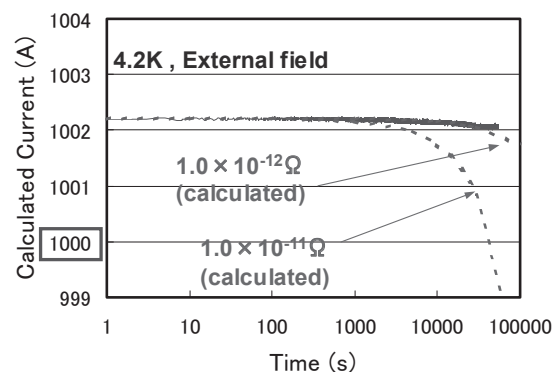


Fig.3 Time dependence measurement of the current calculated from the trapped field in the closed-loop circuit ($I=1000A$).

参考文献

- [1]田中 他, 2004 年度秋季低温工学・超電導学会 [1D-a06]

液体水素ポンプ用 MgB₂ 超電導モータにおける固定子巻線の交流損失評価

AC loss evaluation of stator winding in MgB₂ superconducting motor for liquid hydrogen pump

梶川 一弘(九州大学); 中村 武恒(京都大学)

KAJIKAWA Kazuhiro (Kyushu University); NAKAMURA Taketsune (Kyoto University)

E-mail: kajikawa@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

エネルギー問題や環境問題を是正する先進技術の 1 つとして、将来の水素利用社会の可能性が検討されている[1]。燃料電池などで水素を酸化しエネルギーを得るためには、水素を安全にかつ安定的に製造・輸送・貯蔵・移送する必要がある、圧縮ガスとしてだけではなく液化ガスとして水素を利用する形態も不可欠である。一方、21 世紀に発見された新しい超電導体である MgB₂ は臨界温度が 39 K のため[2]、大気圧中の沸点が 20 K の液体水素中で超電導状態を維持できる。ただし、現状の MgB₂ 線材は 20 K 下で数 T の外部磁界を印加すると臨界電流密度が著しく減少することから[3]、低磁界応用に適すると考えられる。

このような背景の下、超電導技術と水素利用社会を効果的に融合することによるエネルギー問題や環境問題の解決へ向けた基礎的研究活動の一環として、極低温容器内の液体水素の残存量を高精度かつ高信頼度に計測可能な、超電導式液位センサの基礎動作特性を実験的に検証した[4]。また、液体水素を循環もしくは移送するポンプの駆動部として、MgB₂ 線材を用いた超電導誘導/同期モータも新規提案した[5,6]。今回は、当該モータの固定子巻線を MgB₂ 線材で構成した場合に発生する交流損失について、有限要素法を用いて数値解析したので報告する。

2. 有限要素解析

複数の超電導線材で構成される集合導体で発生する交流損失を数値的に評価する方法として、解析領域に流れる電流が作る磁界(自己磁界)を未知数とする有限要素法が提案されている[7]。その支配方程式は、次で表される。

$$\nabla \times (\rho \nabla \times \mathbf{H}_s) = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{H}_s + \mathbf{H}_e) \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{H}_s は自己磁界、 ρ は抵抗率である。また、 \mathbf{H}_e は空間的に一様な外部印加磁界であり、ここでは $\mathbf{H}_e = \mathbf{0}$ とする。集合導体の断面全体を取り囲む閉曲線 C に対して、境界条件は

$$\oint_C \mathbf{H}_s \cdot d\mathbf{s} = I_i \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 I_i は集合導体に流れる全輸送電流である。この集合導体を構成する N 本の素線が互いに電氣的に絶縁されている場合、各素線の表面経路 $C_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 上で次に示す拘束条件を設定する必要がある[8]。

$$\oint_{C_i} \mathbf{H}_s \cdot d\mathbf{s} = I_i \quad (3)$$

ここで、 I_i は i 番目の素線に流れる輸送電流であり、

$$\sum_{i=1}^N I_i = I \quad (4)$$

を満足する。支配方程式(1)を有限要素解析するために、空間に関しては Galerkin 法で、時間に関しては後退差分法で離散化することにより、各時間ステップにおける自己磁界分布を求めることができる。抵抗率 ρ として臨界状態モデルを仮定すると、(1)式は非線形方程式となるため、Newton-Raphson 法を用いて各時間ステップで収束計算する必要がある。得られた各時刻の自己磁界分布を用いて、単位長さ・単位時間当たりの交流損失 P (W/m) は

$$P = f \oint_S \rho |\nabla \times \mathbf{H}_s|^2 dS \quad (5)$$

から計算できる。ここで、 f は周波数、 S は集合導体の全断面領域である。

3. 固定子巻線の交流損失評価

固定子巻線を超電導線材で構成することによる低損失化の可能性を検証するために、既存機(3相4極、定格出力 1.5 kW、公称電圧 200 V、定格回転数 1,720 rpm、固定子スロット数 36 の誘導モータ)をベースに検討することにする。この場合、必要な起磁力は 234 A_{peak} のため、臨界電流 150 A を持つ線径 1 mm (フィラメント径 0.5 mm) の MgB₂ 単芯線材を 3 ターン巻線した固定子を想定する[9]。従って、1 ターン当たりに流れる交流電流振幅は 78 A となる。この固定子巻線の結線方法や鉄心形状は既存機と全く同様とし、モデル化した鉄心スロット内に配置した固定子巻線に対する有限要素解析を実施することで、定格周波数 60 Hz で発生する交流損失を評価した。その結果として、銅線の残留抵抗比 RRR を用いて既存機における固定子巻線を 20 K に冷却したと想定した場合の一次抵抗値と比較しても、数値解析により得られた交流損失 P を定格電流の 2 乗で割ることで一次抵抗換算したものは非常に小さく、固定子巻線の超電導化による更なる高効率化が実現できる見通しを得ることができた。

4. 低損失化に関する一考察

従来の超電導線材として、大振幅交流磁界に対する履歴損失を低減する必要性から、常電導金属母材中に細いフィラメント状超電導体を多数本配置する多芯線が開発された。しかし、本研究が対象とするような鉄心内に超電導巻線を配置する場合、印加磁界は自己磁界が主体となるため、この視点から低損失な線材構造を再検討する必要がある。そこで、自己磁界環境下における交流損失低減の方向性について概算してみた。固定子巻線を半径 R の超電導単芯線で近似すると、電流振幅 I_m に対する単位長さ・一周期当たりの交流損失 $Q (= P/f, \text{J/m-cycle})$ は、次式で与えられる[10]。

$$Q = Q_0 \left[(1 - i_m) \ln(1 - i_m) + \frac{(2 - i_m) i_m}{2} \right] \approx \frac{\mu_0 I_m^3}{6\pi I_c} (i_m \ll 1) \quad (6)$$

ここで、臨界電流 $I_c (= \pi R^2 J_c)$ を用いて、 $i_m = I_m/I_c$ 、 $Q_0 = \mu_0 I_c^3 / \pi$ である。臨界電流密度 J_c 一定の条件下で必要な起磁力 I_m を一定とすると、半径 R を大きくすることが低損失化に寄与する。これは負荷率 i_m の低下を意味するが、線材中心部には磁束が全く侵入しないため、中空構造で十分となる。なお、可撓性の確保や磁氣的不安定性の抑制への十分な配慮も、事前に念頭に置く必要があるといえる。

参考文献

1. H. Hirabayashi: J. Cryo. Soc. Jpn. **40** (2005) 276.
2. J. Nagamatsu, et al.: Nature **410** (2001) 63.
3. M. Tomsic, et al.: Physica C **456** (2007) 203.
4. K. Kajikawa, et al.: Abst. CSJ Conf. **76** (2007) 1D-a04.
5. K. Kajikawa, et al.: Abst. CSJ Conf. **77** (2007) 1D-a11.
6. T. Nakamura, et al.: Abst. CSJ Conf. **77** (2007) 1D-a12.
7. K. Kajikawa, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **13** (2003) 3630.
8. T. Hayashi, et al.: Physica C **426-431** (2005) 1328.
9. T. Nakamura, et al.: Abst. CSJ Conf. **77** (2007) 1B-a08.
10. H. London: Phys. Lett. **6** (1963) 162.

(Y_{1-x}RE_x)BCO(RE=La, Pr)超伝導バルクの作製と特性評価

Preparation and properties of (Y_{1-x}RE_x)BCO (RE=La,Pr) bulk superconductor

佐藤清知、山口大吾、内藤智之、藤代博之(岩手大)

SATO Kiyotomo, YAMAGUCHI Daigo, NAITO Tomoyuki, FUJISHIRO Hiroyuki (Iwate Univ.)

E-mail: dof211293@yahoo.co.jp

1.はじめに

REBaCuO 超伝導バルクの臨界電流密度 J_c 向上の手段の一つとして、元素置換によるピン止め中心の導入がある。YBCO バルクにおいて CuO_2 面の Cu を Zn や Ni で、 CuO 鎖の Cu を Ga や Co で微量の置換を行うことで、 $J_c(B)$ 特性が向上することが報告されている[1]。また、Y サイトに微量の Lu を置換することでも $J_c(B)$ 特性の向上が報告されている[2]。本研究では YBCO バルクの Y サイトをイオン半径の大きい La または Pr イオンで微量置換した場合の $J_c(B)$ 特性の向上について検討した。

2.実験方法

(Y_{1-x}RE_x)Ba₂Cu₃O_{7- δ} (RE=La, Pr)[X=0, 0.003, 0.01]焼結体は Y₂O₃、BaCO₃、CuO および、La₂O₃(又は Pr₆O₁₁)を秤量・混合し 900°C で 24h の仮焼、920°C で 48h の本焼を行い作製した。(Y_{1-x}RE_x)Ba₂Cu₃O_{7- δ} と Y₂BaCuO₅ 焼結体をモル比 10:3 で用意し、これに 0.5wt% の CeO₂ を加えた混合粉を直径 20mm 厚さ 10mm のペレット状に加圧・成形し前駆体とした。バルク試料は cold seeding による MTG 法で作製した。種結晶には Nd123 単結晶を使用した。最初 1020°C まで加熱して 2h 保持した後、包晶温度まで急冷し、そこから 80°C/h で徐冷して結晶成長を行った。その後得られたバルクを 400°C で 1 週間酸素アニールした。磁化測定は SQUID 磁束計を用いて行った。測定試料は種下 1mm および 3mm の位置から切り出した。磁化の温度依存性から超伝導転移温度 T_c を決定した。また、磁化の磁場依存性から拡張型 Bean モデルを用いて、臨界電流密度 J_c の磁場依存性を見積もった。

3.結果と考察

fig.1 に (Y_{1-x}RE_x)BCO バルクの各置換量における磁化の温度依存性を示す。いずれの置換量においても T_c は 90~91K 付近を示しており、今回の置換では T_c の大きな減少は見られなかった。fig.2 に (Y_{1-x}RE_x)BCO バルクの各置換量における 77K での J_c の磁場依存性を示す。La, Pr 共に置換量 X=0.01 の試料においては無置換の試料に比べて $J_c(B)$ 特性の向上は見られなかった。La 置換 X=0.003、種下 3mm の試料では J_c が僅かに向上したが、これについては再現性の確認が必要である。現在、更に置換量の小さいバルクを作製中であり、講演ではそれらの結果も併せて報告する予定である。

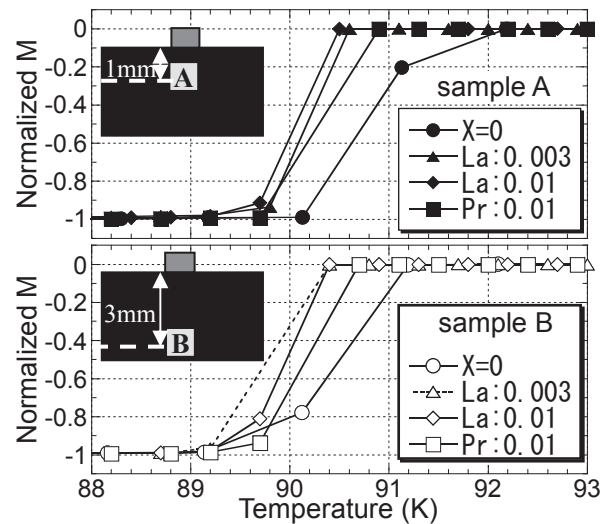


fig.1. Temperature dependence of normalized M for (Y_{1-x}RE_x)BCO bulk. Sample A and B are cut from the position 1mm and 3mm below the bulk surface of seed, respectively.

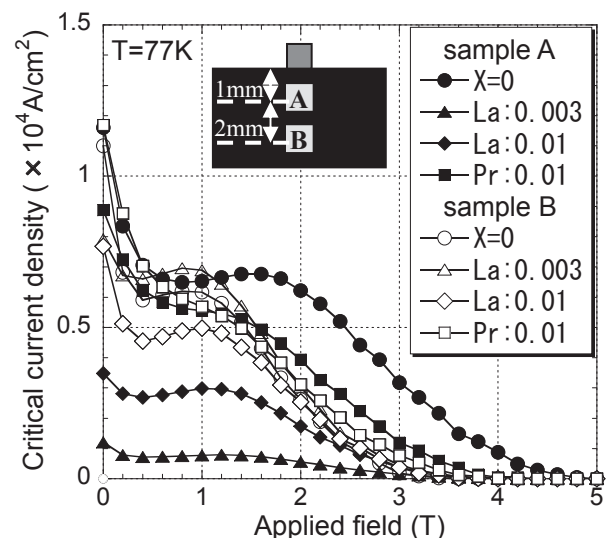


fig.2. Magnetic field dependence of J_c at 77K for (Y_{1-x}RE_x)BCO bulk.

参考文献

- [1]Y. X. Zhou et al., Supercond. Sci. Technol. 19 (2006) S556
 [2]Y. Ishii et al., J. Cryo. Soc. Jpn. (2007) Vol.42 270

MgB₂ 単結晶における Intrinsic ピンニングの観測 Observation of intrinsic pinning effect in MgB₂ single crystals

野島 勉, 高橋 一真, 長徳 峰美 (東北大金研); KANG Byeongwon, LEE Sung-Ik (Pohang 理工大)

NOJIMA Tsutomu, TAKAHASHI Kazuma, CHOTOKU Minemi (IMR, Tohoku Univ.);

KANG Byeongwon, LEE Sung-Ik (Pohang Univ. Sci. Tech.)

E-mail: nojima@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

MgB₂ は Mg 層と B 層が交互に積層した結晶構造を有する。B 層が主として超伝導を担うことより、銅酸化物超伝導と同様、層状構造に由来する Intrinsic ピンニングの存在が期待されている[1]。しかし *c* 軸方向のコヒーレンス長(約 2.5nm)が *c* 軸長(0.35nm)に比べ非常に長いことから、この効果が本当に存在するかそれほど明らかではない。我々は前回、MgB₂ の Mg 位置を Al で置換することにより、*c* 軸と垂直方向のピンニングが選択的に増大することを報告した[2]。この原因を理解するためには、MgB₂ が本来、この方向に強いピンニング特性を示すかどうか確かめる必要がある。そこで本研究では、純良な(不純物によるピンニング力の小さい)MgB₂ 単結晶を用いて、磁気トルク $\tau (=M \times H)$ の角度依存性を測定することにより、磁場方向に対するピンニング特性の変化を詳細に調べた。

2. 実験方法

測定に用いた試料は 3 GPa の高圧下で合成された、サイズ 100 μm の単結晶である。AFM 用カンチレバーを用いた測定法[3]を用い、試料のトルク曲線(磁場 *H* 依存性と角度 θ 依存性)を測定した。これはカンチレバーの先に試料を貼り付け、*c* 軸を磁場方向から θ の角度傾けた時に発生するトルク τ を、カンチレバーの曲がりを検知するピエゾ抵抗の変化により検出するという方法である。

3. 結果と考察

Fig.1 に MgB₂ の $T = 4.2 \text{ K}$, $H = 1.2 \text{ T}$ における角度依存性 $\tau(\theta)$ を示す。ほとんどの角度の範囲において τ のヒステリシスは小さく(ほぼ熱平衡の $\tau(\theta)$ に近い)、試料のもつピンニング力が非常に小さいことがわかる。しかし Fig.1 挿入図に示すよう、 $\theta = 90 \pm 1^\circ$ の非常に狭い角度範囲において、ヒステリシスの増大があることが観測された。実際に臨界電流密度に同様な変化が現われることを確かめるため、 θ を固定して測定した $\tau(H)$ 曲線を Kogan の式を用いて磁化曲線に変換することにより、磁化ヒステリシス ΔM の θ 依存性を求めた。Fig.2 に $T = 4.2 \text{ K}$ と 30 K における $H = 0.7 H_{c2}$ での $\Delta M(\theta)$ を示す。これを見ると確かに $89^\circ < \theta < 90^\circ$ の範囲に $\Delta M(\theta)$ の鋭いピークが存在することわかる(89.5°の ΔM は 80°の値の約 10 倍である)。さらに ab 面から傾けた磁場方向では、観測される磁束格子融解に伴う磁化の不連続変化や order-disorder 転移に伴う磁化曲線のピーク効果も、 $\theta = 90 \pm 1^\circ$ という限られた角度範囲では、観測されなくなった。これらの結果は、純粋な MgB₂ 単結晶においても確かに、結晶構造に由来する、Intrinsic ピンニング効果が存在することを示している。

前述したように MgB₂ では、磁束線コアのサイズ(コヒーレンス長)が秩序パラメータの *c* 軸方向への振動周期に比べ 10 倍以上大きい。このような状況でなぜ層状結晶構造に起因するピンニングが有効になるのかを議論したい。

参考文献

[1] K. Takahashi et al, Phys. Rev. B 66 (2002) 012501

[2] 野島勉, 2007 年度秋季低温工学・超電導学会, 3A-a05

[3] E. Ohmichi, T. Osada, Rev. Sci. Instr. 73 (2002) 3022.

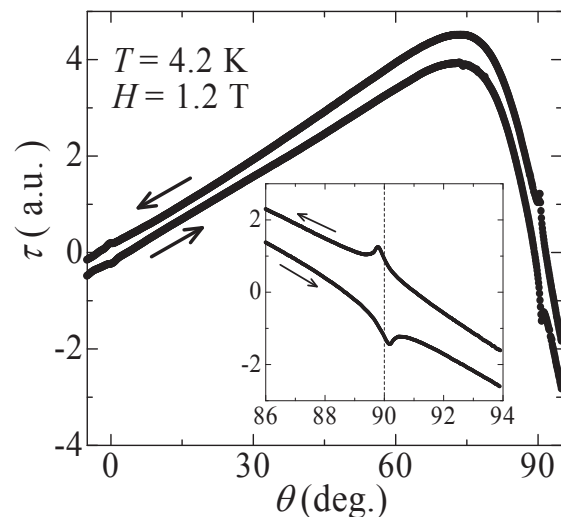


Fig.1 Angular dependence of magnetic torque for MgB₂ and Mg_{0.88}Al_{0.12}B₂ single crystals at $T = 4.2 \text{ K}$ and $H = 1.2 \text{ T}$.

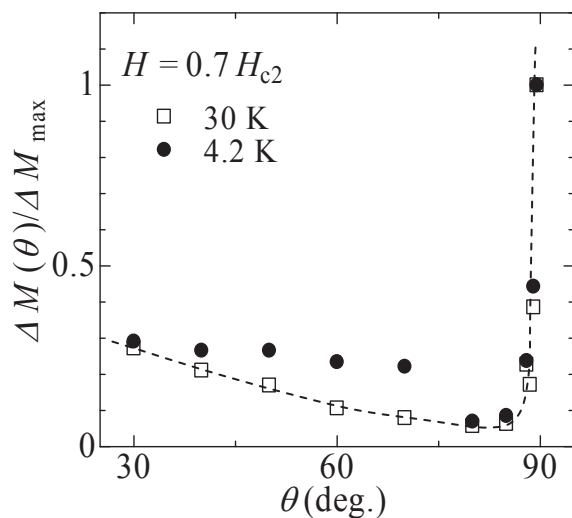


Fig.2 Field dependence of magnetization hysteresis ΔM in Mg_{0.88}Al_{0.12}B₂ for $\theta = 10^\circ$ and 88° .

作製条件の違いによるナノロッド構造と超電導特性

Nanorod structures and superconducting properties under various preparation conditions

一瀬 中(電中研); Paolo Mele, 松本 要(九工大); 甲斐英樹, 向田昌志(九大); 堀井 滋(東大);
喜多隆介(静岡大); 吉田 隆(名大)

ICHINOSE Ataru(CRIEPI); MELE Paolo, MATSUMOTO Kaname (Kyushu Inst. Univ.); KAI Hideki, MUKAIDA Masashi (Kyushu Univ.); HORII Shigeru (Univ. of Tokyo); KITA Ryusuke (Shizuoka Univ.); YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.)

E-mail: ai@criepi.denken.or.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y 超電導膜(RE: 希土類元素)を用いた超電導線材において磁場中の臨界電流密度(J_c)の向上が超電導機器への適用の1つの鍵となっている。そのため、超電導膜のナノ構造を制御して磁束の動きを止める人工ピンの研究が行われている。c軸相関ピンとしてREBa₂Cu₃O_y超電導膜に導入したBaZrO₃ナノロッドは、その作製方法の簡便さ、および、77K近傍温度におけるピン力の強さから、実用テープ線材の人工ピンとして期待されている[1,2]。また、BaZrO₃と同様にBaを含んだペロブスカイト構造をもつBaSnO₃、Ba(Nb_{0.5}Er_{0.5})O₃もREBa₂Cu₃O_y超電導膜の内部にナノロッドを形成することがわかっている[3,4]。

ナノロッドはc軸相関ピンとして機能するが、構造の制御が超電導特性に影響を与えることがわかっている[5]。したがって、ナノロッド材料、作製条件によりナノロッド構造がどのように変化するか、また、それが超電導特性にどのように影響するかを調べることが重要となる。

2. 実験方法

BaZrO₃、BaSnO₃ ナノロッドを含んだ試料は不純物量として3wt%を添加したYBa₂Cu₃O_y材料のターゲットを用いてPLD法により作製した。基板温度は800℃、酸素濃度は200mmTorrである。膜厚は約1μmとした。Ba(Nb_{0.5}Er_{0.5})O₃ ナノロッドを含んだ試料は、1.5wt%のBaNb₂O₆を添加したErBa₂Cu₃O_y材料のターゲットを用いてPLD法により作製した。膜厚を約1μm、基板温度を710℃と膜厚を約300nm、基板温度を750℃の2つの超電導膜を作製した。

作製した超電導膜はマイクロサンプリング法によりFIB装置を用いて薄片化し、TEM観察用試料を得た。超電導特性は四端子法を用いて、磁場中臨界電流特性、および、臨界電流密度の磁場印加角度依存性を測定した。

3. 結果および考察

図1にBaZrO₃、BaSnO₃ナノロッドが生成したYBa₂Cu₃O_y

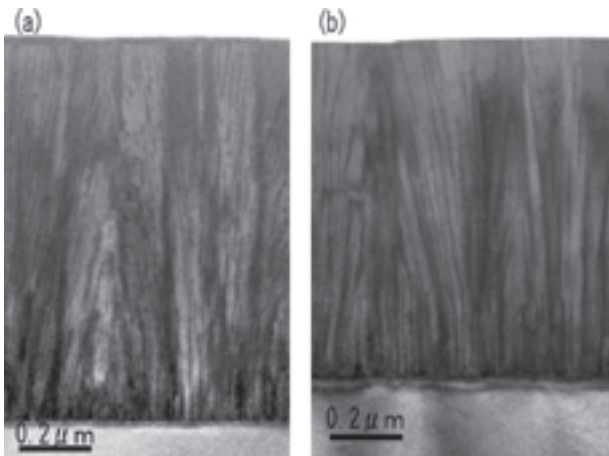


Fig.1 Cross-sectional TEM images of the YBCO superconducting films with (a) BaZrO₃ and (b) BaSnO₃ nanorods

超電導膜の断面TEM像、および、図2にBa(Nb_{0.5}Er_{0.5})O₃ナノロッドが生成したErBa₂Cu₃O_y超電導膜の断面TEM像を示す。図1は同じ成膜条件で、ナノロッドを形成する材料を変えた超電導膜の内部構造である。膜に垂直方向においてBaSnO₃ではナノロッド構造の乱れが少なく、より直線的であること、および、高分解能TEM像からナノロッドの径が異なることが分る。図2は、材料は同じで、成膜温度が710℃(a)と750℃(b)の超電導膜の内部構造である。図2(a)に挿入した図は図2(b)を同じスケールで示した。成膜温度が710℃の試料では、ナノロッド径が細く、c軸方向に対して細かく揺らいでいるのに対して、成膜温度が750℃の試料では、ナノロッド径が太く、より直線的である。

臨界電流特性の測定結果から、BaZrO₃とBaSnO₃ナノロッドを含んだ超電導膜の77Kにおけるピン力は、BaSnO₃ナノロッドの試料が約2倍大きいことがわかった。この差は、BaZrO₃とBaSnO₃のナノロッドのc軸方向における直線性の差に関係すると考えられ、BaSnO₃のナノロッドの直線性がより高いことで説明可能である。このように、臨界電流特性はナノロッド構造を反映して変化する。その他のナノロッド構造と臨界電流特性の関係、および、作製条件によるナノロッド構造の変化についても議論する。

参考文献

1. M. Mukaida, et al.: Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 44, No. 30 (2005) p.L953
2. P. Mele, et al.: Supercond. Sci. Tech. 20 (2007) p.244
3. K. Yamada, et al.: Extended Abstracts of JSAP Autumn Meeting, Vol. 68, No. 1 (2007) p.287
4. K. Yamada, et al.: Appl. Phys. Lett. 92 (2008) p.112503
5. A. Ichinose, et al., Supercond. Sci. Tech. 20 (2007) p.1144

謝辞

本研究の一部は(独)科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業の一環として行われたものである。

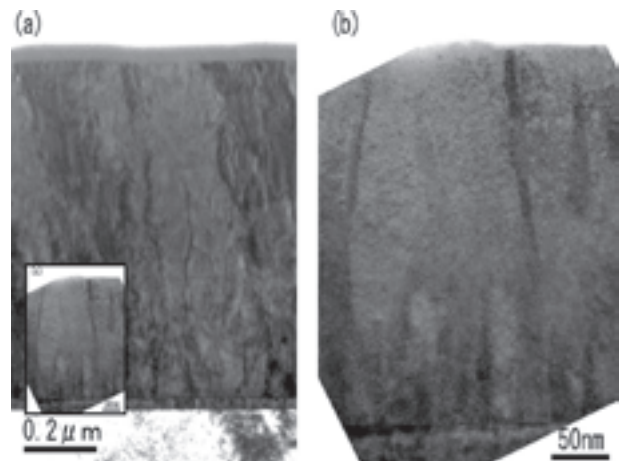


Fig.2 Cross-sectional TEM image of the ErBCO superconducting films deposited at (a) 710℃ and (b) 750℃ with Ba(Nb_{0.5}Er_{0.5})O₃ nanorods

DyBCO コート線材の臨界電流密度における重イオン照射の影響

Efect of heavy ion irradiation on the critical current density
in DyBCO coated conductor

磯部 現, 木内 勝, 小田部 荘司, 松下 照男 (九工大);
岡安 悟 (原子力機構); Werner Prusseit (THEVA GmbH)

ISOBE Gen, KIUCHI Masaru, OTABE Edmund Souji, MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.);
OKAYASU Satoru (JAEA); Werner Prusseit (THEVA GmbH)

E-mail: isobe@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

はじめに 高温高磁界下で高い臨界電流密度を得るために、REBaCuO 超伝導体に人工的にピンニング・センターを導入することが行われており、臨界電流密度が改善されつつある。しかし、どのようなピンニング・センターが臨界電流密度の向上に有効に働くかまだ明らかでない。本研究では、DyBCO コート線材に幾つかの異なる条件で重イオンを照射して柱状欠陥を導入し、照射前後の臨界電流密度の評価を行った。

実験 試料は THEVA GmbH による DyBCO コート線材であり、厚さ 90 μm の Hastelloy C276 上に、中間層として ISD (Inclined Substrate Deposition) 法による厚さ 3.7 μm の MgO 配向層と 0.3 μm の MgO-cap 層が作製され、その上に共蒸着法により厚さ 1.5 μm の DyBCO 層、0.5 μm の Ag 保護膜が成膜されている。実験は、テープ面に対して垂直方向から Au または Ni イオンを照射し、照射前後の臨界電流密度を測定した。照射の際のエネルギーは Au イオンでは 320 MeV、Ni イオンでは 200 MeV であり、照射量はマッチング磁界 B_ϕ に換算して、Au イオンで 1.0 T、Ni イオンで 0.5 T、1.0 T、3.0 T、5.0 T であった。臨界温度 T_c は照射前が 89.7 K、Au イオン照射後は 88.3 K、Ni イオン照射後は照射量が少ない方からそれぞれ 89.6 K、89.6 K、89.5 K、89.2 K であった。また、照射により導入された柱状欠陥の半径は Au イオン照射の場合は約 5 nm、Ni イオンの場合は約 2 nm であり超伝導層を貫通している。磁界はテープ面に対して垂直、すなわち円柱状欠陥に対して平行に印可し、SQUID 磁力計による直流磁化測定から臨界電流密度を評価した。

結果と検討 Fig. 1 に Ni イオンを $B_\phi=3.0$ T 照射した前後の J_c - B 特性を示す。Au イオンを照射した場合に見られたような高磁界下での大幅な特性改善¹⁾は、Ni イオンの照射では見られなかった。また T_c で規格化した不可逆磁界 B_i の温度依存性を Fig. 2 に示す。 B_i も Ni イオン照射では Au イオン照射のように大幅な改善は得られていない。これらの結果について、磁束クリープ・フローモデルを用いて解析を行った。また要素的ピン力の加算理論を用いて、柱状欠陥で予想される仮想的な臨界電流密度の最頻値を計算し、更に競合的なピンであることを考慮して、磁束クリープ・フローモデルの結果との比較を行った。その結果、Ni イオン照射による欠陥半径が 2 nm よりも小さい可能性があることが分かった。まだ完全な一致は得られていないが、2 つの理論で実験結果を説明することが

できそうである。したがって加算理論より、臨界電流密度の改善にはサイズが大きく、数密度が高いピンが有効であると考えられる。

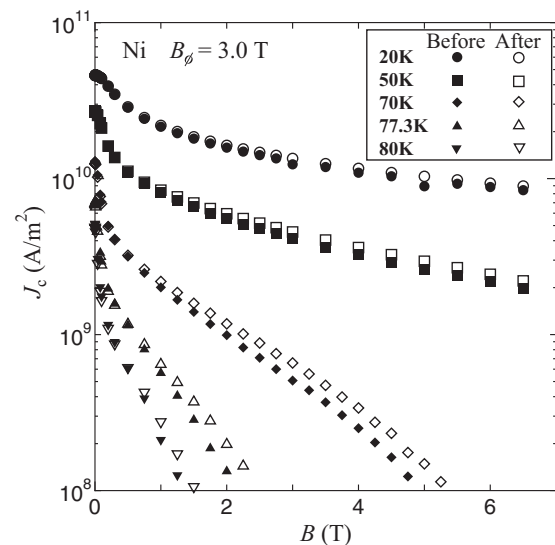


Fig.1 Critical current density of DyBCO coated conductor before and after the Ni ion irradiation with $B_\phi=3.0$ T.

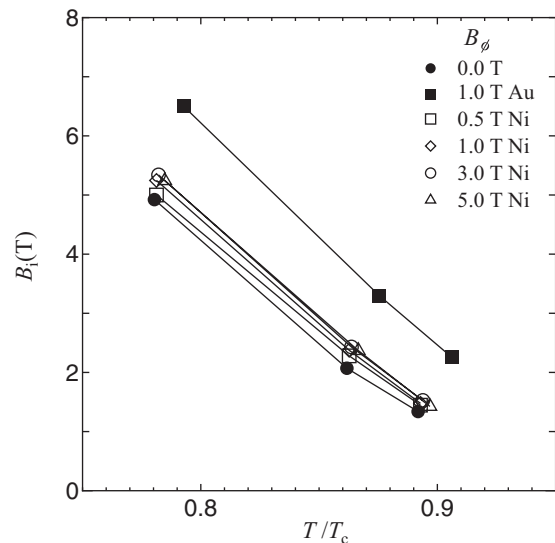


Fig.2 Irreversibility field of DyBCO coated conductor before and after the irradiation.

参考文献 G. Isobe *et al.* Abstract of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p. 70.

有効電力法による磁気結合した超電導コイルの保護システムの開発

Protection system for magnetically coupled superconducting coils by active power method

井上 貴裕, 七戸 希, 村瀬 暁 (岡山大学)

INOUE Takahiro, NANATO Nozomu, MURASE Satoru (Okayama University)

E-mail: nanato@cc.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

超電導コイルのクエンチ検出法として、著者らはこれまでに有効電力法を提案し、その有効性を報告している^{[1][2]}。本稿では、磁気結合した2層の超電導コイルの保護を行うために、2層の高温超電導コイルを作製し、内層と外層の両コイルの保護試験を行ったので、その結果について報告する。

2. 有効電力法

Fig.1 の回路において超電導コイル SC1 のクエンチ検出を行うことを考える。このとき以下の式のように行うのが有効電力法である。

$$v_{SC1} = r_1 i_1 + L_1 di_1/dt + M di_2/dt \quad (1)$$

$$v_{RC1} = m_1 di_1/dt \quad (m_1=L_1) \quad (2)$$

$$\Delta v_1 = v_{SC1} - v_{RC1} = r_1 i_1 + M di_2/dt \quad (3)$$

$$v_{RC2} = m_2 di_2/dt \quad (4)$$

$$\Delta v_1' = \Delta v_1 - k v_{RC2} = r_1 i_1 \quad (k=M/m_2) \quad (5)$$

$$P = \Delta v_1' i_1 = r_1 i_1^2 \quad (6)$$

$$P'_{(s)} = 1/(1 + sT) P_{(s)} \quad (7)$$

両端電圧 v_{SC1} から抵抗性電圧のみを検出するために、コイルに発生する自己誘導性電圧及び、超電導コイル SC2 により生じる相互誘導性電圧の除去を行う必要がある。SC1, SC2 の回路中にはそれぞれ誘導性電圧検出コイル RC1, RC2 が設置されており、これにより(3)-(5)式のように自己及び相互誘導性電圧の除去を行い、得られた抵抗性電圧を(6)式のように瞬時有効電力に変換し、これを(7)式のようにフィルタ処理してノイズを除去したものをクエンチ信号として取り扱う方法である^{[1][2]}。ただし、(7)式はラプラス変換を用いた式である。また、SC2 を対象としたときも同様にすればよい。

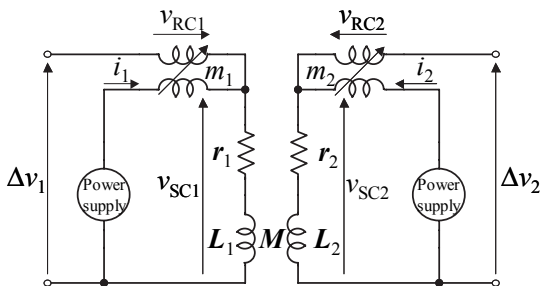


Fig.1 Experimental circuit

3. クエンチ保護試験

試験コイルとして、Bi-2223 高温超電導 2 層コイルを使用し、液体窒素温度からの昇温によるクエンチに対する保護動作を確認する。SC1 に $i_1=90$ A の直流電流を通电している状態で、SC2 に $i_2=82$ Apeak, 20 Hz の三角波電流を通电し、SC1 に相互誘導を生じさせる。三角波を通电したのは、マグネットの励磁と減磁を模擬するためである。クエンチ判定に用いる閾値は 5.9W に設定した。試験結果を Fig.2 に示す。同図 P' によりクエンチが検出され、設定した閾値に達した瞬間に通電電流 i_1 が遮断され保護動作が行われていることがわかる。紙面の都合上省略するが、SC1 に三角波電流、SC2 に直流電流を通电した場合でもクエンチ保護を行うことができた。

本研究の一部は文部科学省(科学研究費補助金・若手 B (19760277))の助成によることを付記し、ここに謝意を表します。

参考文献

- [1] K. Takeuchi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.88
- [2] N.Nanato:IEEJ Trans.FM,Vol.128,No.6

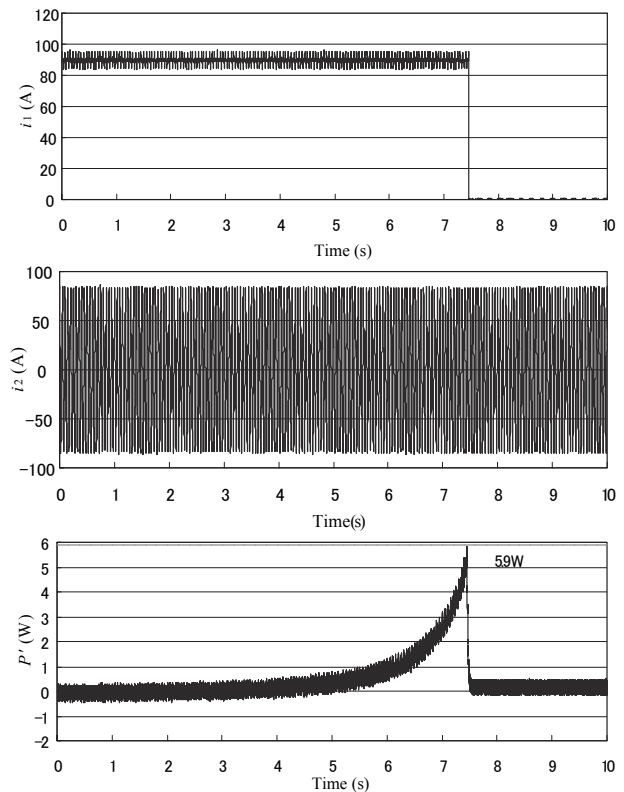


Fig.2 Experimental results for a quench detection test

AE 信号の時間周波数可視化による高温超電導巻線の局所的な温度上昇検出

Detection of the local temperature rise in HTS winding by the time-frequency visualization of AE signals

七戸 希, 村瀬 暁(岡山大学)

Nozomu Nanato, Satoru Murase (Okayama University)

E-mail:nanato@cc.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

高温超電導コイルを過大な局所的な温度上昇から保護することを目的として、著者らは熱電対や電圧端子などを使用しない、すなわちコイルの電気絶縁特性を低下させない温度上昇検出法として AE 信号の時間周波数可視化法を提案し、Bi2223 短尺試料にてその有効性を確認している¹⁾。本稿では Bi2223 および YBCO 巻線に本方法を適用し、その有効性を検討した。

2. 実験装置および方法

提案法は高温超電導巻線の局所的な温度上昇に伴う AE 信号をウェーブレット変換により高い SN 比にて検出する方法である。Fig. 1 に実験装置を示す。高温超電導巻線(高さ 40mm, 直径 40mm の GFRP ボビン, 6 ターン)をはんだごてにて局所的(5mm 長)に劣化させ、劣化箇所の I_c 以上の通電を行うことで局所的に発熱させる。それに伴う AE 信号を巻線両端電圧と劣化箇所の温度とともにデジタルオシロスコープにて観測し、AE 信号に関しては PC へデータを転送し、次式のウェーブレット変換を行う。

$$(W_{\psi}f)(b, a) = \int_{-\infty}^{\infty} W(a)\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)f(t)dt$$

$$a = 1/2\pi f \quad (f: \text{frequency}), \quad \psi(t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma} e^{-t^2/\sigma^2} e^{-it}$$

$W(a)=1/a$, σ : constant = 8 (arbitrarily defined)

マザーウェーブレット $\psi(t)$ は時間周波数空間にて局在性が最良の Gabor 関数、重み関数は信号の周波数ごとの振幅を保持させるため $W(a)=1/a$ とした。

3. 実験結果

Fig. 2 に Bi2223 巻線の実験結果を示す。77K に伝導冷却されており、 I_c は 77K 自己磁場中にて劣化部 6A, 健全部 90A である。同図(a)より I_c 以上の通電による常電導転移, (b)よりそ

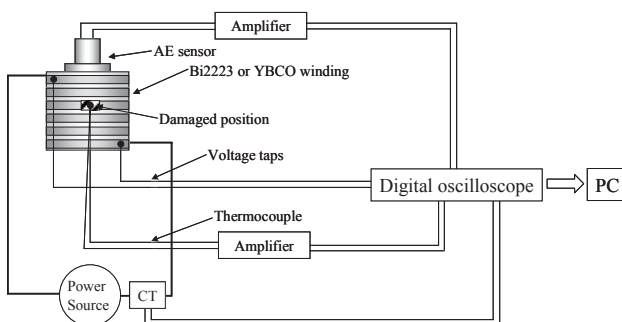


Fig. 1 Experimental setup

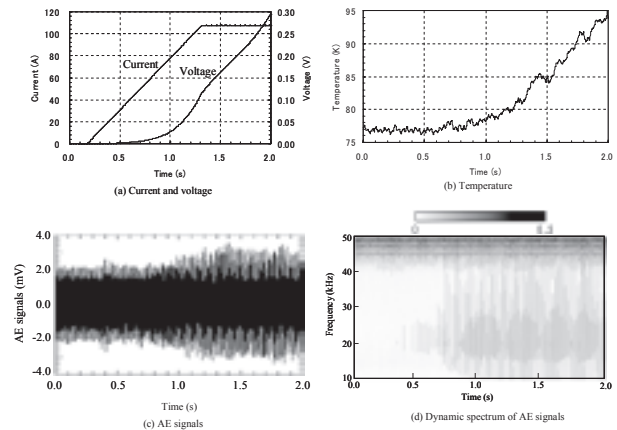


Fig. 2 Experimental results for a Bi2223 winding

れによって局所的に温度上昇が発生していることがわかる(健全部で温度上昇はほとんどないことを確認している)。(c)は AE 信号であるが、温度上昇に伴って約 0.8s から AE 信号が発生しているように観測されるがその SN 比は低い。(d)はウェーブレット変換による AE 信号のダイナミックスペクトラムである。20kHz を中心とした周波数帯域に発生している信号が AE 信号であり、その発生時間帯は(b)の温度上昇が発生している時間帯とよく一致している。40kHz 以上のノイズと時間周波数空間にて明確に分離できることから、ノイズに比べて微弱な AE 信号を高い SN 比にて検出できる。以上より提案法にて熱電対や電圧端子などを使用せず高い精度で高温超電導巻線の局所的な温度上昇を検出できることが示唆されたと言える。なお、本実験での AE 信号の発生要因はボビンと線材の熱膨張の差による位置ずれであると考えている。

4. まとめ

本稿では、AE 信号の時間周波数可視化による温度上昇検出法の高温超電導巻線に対する有効性について報告した。検証実験の結果より、提案法にて、絶縁特性を低下させない高精度の温度上昇検出を実現できる可能性が示唆された。

本研究の一部は文部科学省(科学研究費補助金・若手 B (19760277)), 財団法人マツダ財団, 財団法人三豊科学技術振興協会の助成によることを付記し、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) N. Nanato: "Detection of temperature rise in Bi2223/Ag tape by time-frequency visualization of AE signals", Cryogenics 47 (2007) 8-11

伝導冷却された MgB₂ 線材における常伝導部伝播の数値シミュレーション

Numerical simulation of normal-zone propagation in conduction-cooled MgB₂ wires

久保 輝朗, 中尾 彰浩, 田中 和英, 松尾 政晃, 佐藤 誠樹, 柁川 一弘, 船木 和夫(九州大学);
岡田 道哉(日立);熊倉 浩明(NIMS);林 秀美(九州電力)

KUBO Teruaki, NAKAO Akihiro, TANAKA Kazuhide, MATSUO Masaaki, SATO Seiki, KAJIKAWA Kazuhiro, FUNAKI Kazuo (Kyushu Univ.);
OKADA Michiya (Hitachi Ltd.); KUMAKURA Hiroaki (NIMS); HAYASHI Hidemi (Kyushu Electric Co., Inc.)

E-mail:kubo@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

超伝導機器の巻線がクエンチするような万が一の事故時に機器内の超伝導線の焼損を防ぐにはクエンチに至る機構(常伝導領域の伝播現象など)を詳細に把握することが重要である。MgB₂線材は臨界温度 T_c が 39K と高いため、液体水素温度レベルの温度領域に至る幅広い温度領域におけるコイル用巻線として期待できる。コイルの安全面の特性を把握する上で重要な課題のひとつとして、MgB₂線材における常伝導部の伝播現象の解明を進めている。これまで、液体ヘリウム温度における常伝導部の伝播現象について、液体ヘリウムの過渡的冷却効果や伝導冷却を模擬した固体伝熱材中の熱拡散の効果を考慮して数値解析モデルを構築し、伝播速度の定量的評価を行ってきた。これらの結果に基づいて、液体水素温度レベルまでの温度領域で伝導冷却されている MgB₂線材を対象に、これまでに得られている高いレベルの超伝導特性を採用して線材における常伝導部の伝播現象を数値解析し、コイルの安全面からの課題等を検討する。

2. 数値解析

線材断面内での温度分布を無視することにより、一次元熱拡散方程式を Crank-Nicolson 形階差式を用いて、試料の軸方向の温度分布を数値解析している。伝導冷却を模擬した固体伝熱材中の熱拡散の効果を考慮するため、物質中の過渡的熱拡散をモデル化した冷却熱流束の解析式[1]を用いた。

これまで、液体ヘリウム中で MgB₂線をグリースを覆い冷媒の直接冷却の効果を抑えた状態で測定を行っている。グリースの熱伝導率と比熱(エポキシレジンの比熱で代用)を用いて数値解析を行い(Fig.1)、実験結果を定量的に説明した[2]。

今回は、将来 MgB₂超伝導線材の通電特性が改善されることを想定して、最新の MgB₂超伝導線材の臨界電流特性[3]を用い、伝導冷却された MgB₂超伝導多芯線材について常伝導部の伝播現象を数値解析した。その際、線材は GFRP 製ポピンに巻かれているとして、冷却熱流束の解析式に GFRP の熱伝導率と比熱(エポキシレジンの比熱で代用)を採用した。

印加磁界が 8T の臨界電流値を用いた場合の常伝導部の伝播速度の解析結果を Fig.2 に示す。伝播速度は数 m/s 程度で NbTi と比べるとまだ遅いが、Fig.1 の場合と比べると 1 桁程度大きくなった。また、 J_c の更なる向上を想定して印加磁界が 4T の臨界電流を用いた場合の解析結果を Fig.3 に示す。伝播速度は Fig.1 の場合より 2 桁程度大きくなっている。

3. まとめ

本研究では、4.2K~15K で伝導冷却された MgB₂超伝導多芯線材の常伝導部の伝播現象を数値解析した。 J_c が向上することで、従来の NbTi 超伝導線材に匹敵するような伝播速度になると予想されるが、さらに、多様な伝導冷却の環境を考慮して、クエンチ対策について詳細な検討が必要である。

謝辞: 本研究は、科研費基盤研究(A)「電力装置用導体を目指した MgB₂新線材技術開発」(16206032)の支援の下に実施した。

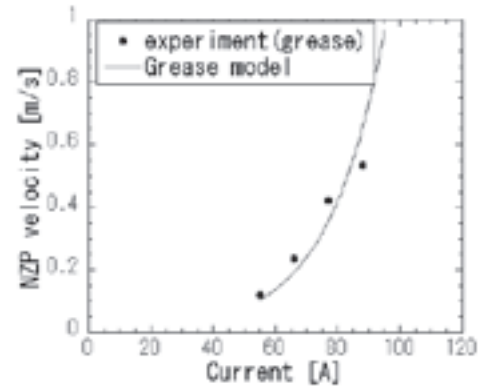


Fig. 1 Comparison between experiment and analysis

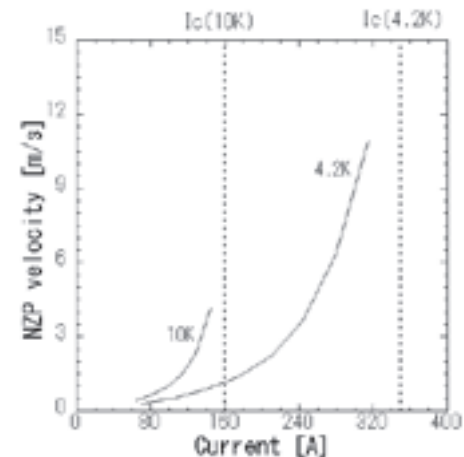


Fig. 2 Analytical NZP velocity ($B=8T$)

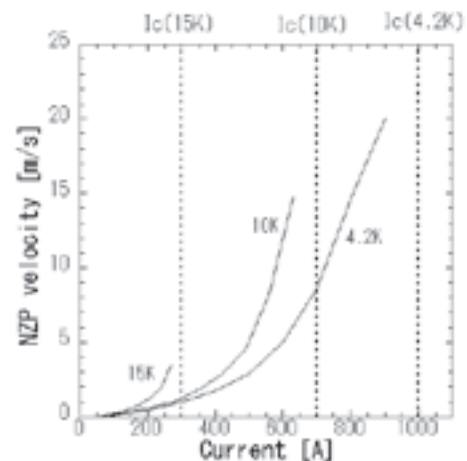


Fig. 3 Analytical NZP velocity ($B=4T$)

参考文献

1. Yu.M. Lvovsky et al.: Cryogenics, Vol.30, (1990) p.754
2. T. Kubo et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.77 (2007) p.99
3. H. Kumakura : Private communication

MgB₂/Al 複合材料の粒子微細化と1mmφ押し線材の特性

Particle refinement for MgB₂/Al composite material and property of 1 mmφ extruded wire

松田 健二, 池野 進, 西村 克彦, 森 克徳(富山大);

菱沼 良光(核融合研); 青山 茂樹(日軽金アクト); 藪本 幸信(新日軽);

MATSUDA Kenji, IKENO Susumu, NISHIMURA Katsuhiko, MORI Katsunori (Univ. TOYAMA)

HISHINUMA Yoshimitsu (NIFS), AOYAMA Shigeki (NLM-ACT), YABUMOTO Yukinobu (Shin-Nikkei)

E-mail : matsuda@eng.u-toyama.ac.jp

1. 緒 言

我々は加工が容易な複合材料の製造方法の確立を目指して、種々のセラミックス粒子とアルミニウムおよびその合金を用いた複合材料を作製しその特性評価を行っている。前回までに、MgB₂粒子を含んだAl複合材料ビレットの作製した。このビレットでは粒子の分散が均一であることから、押し出し加工により10mm径の棒材、さらに3mm径および1mm径の線材への押し出し加工の可能であった[1-3]。MgB₂とAlは低放射化材料であり、核融合炉用低放射化超伝導線材としても有望と考えられ、良好な線材を得ることを目的として、本発表では、複合材料中の粒子間距離を狭くするため充填率の向上を試み、得られた材料の超伝導特性ならびにマイクロ組織について調べた結果を報告する。

2. 実験方法

使用したMgB₂粒子は(株)高純度化学研究所社製の純度99%以上の粒子で、公称40μm以下の粒子(以後も通常の粒子)である。MgB₂粒子の微細化は、乳鉢による粉碎と篩による分粒により、すべてを45μm以下の粒子とした(以後、微細化した粒子)。その後秤量した粒子を金型に入れて押し棒にて常温で軽くプレスし、直径約30mm×42mmの圧粉体プリフォームを作製した。このプリフォームを金型に装てんし、上部からアルミニウム溶湯を注入し、油圧プレスにて溶湯をプリフォーム中に含浸させて複合材ビレットとした。目標体積率は約40%(高体積率MgB₂/Alビレット試料)である。これら複合材ビレットを押し出し機にセットし、所定の温度まで加熱し10mm、3mmおよび1mm径の線材に押し出し加工した。作製した各試料のマイクロ組織は切断、機械研磨及び電解研磨した後に、SEMおよびTEMを用いて観察した。超伝導特性測定用試料は放電加工で切り出し、電気抵抗、帯磁率、磁化率、熱伝導度および比熱を測定した。電気抵抗率はカンタム・デザイン株式会社製物理特性測定システム(PPMS)を使用して、直流四端子法により直流1mAで測定した。測定温度は室温から2Kまで、冷却速度0.2 K/minにて行った。磁化測定も同社製SQUIDを使用して外部磁場100Gで測定した。

3. 実験結果

Fig. 1は通常の粒子を用いて作製した高体積率MgB₂/Alビレットを1mm径の押し出し線材に加工した外観写真である。肉眼で確認できるような亀裂などの目立った欠陥はない

が、MgB₂粒子の幅広い粒度分布から、一部に大きな粒子が表面に出て微細なクラックを形成している部分もあった。Fig. 2には通常の粒子と微細化した粒子を用いて作製した高体積率MgB₂/Alビレットの縦断面のSEM像を示した。(a)の通常の粒子を使用した場合と比較して明らかに、(b)の微細化した粒子を使用したビレットでも粒子は均一に分散しており、目立った製造欠陥も観察されなかった。当日はこの材料の超伝導特性も含め、詳細について報告する。

参考文献

1. K. Matsuda et al: Materials Trans. Vol.47, (2006), pp.1214.
2. 松田ら: 第75回2006年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, (2005), pp.76.
3. 松田ら: 第76回2007年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, (2007), pp.78.

謝 辞

本研究はNIFS平成19年度共同研究[NIFS 07KFRF038]および富山大学VBLプロジェクト研究およびにて行われた。



Fig. 1 The extruded 1mmφ wire of high-V_f MgB₂/Al composite material.

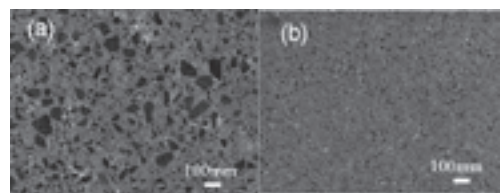


Fig. 2 SEM images of high-V_f MgB₂/Al composite material with different particles. (a) normal particles and (b) grinded and filtered particles.

浮上式鉄道用超電導磁石の機械加振試験(2)

～推進・浮上同時加振のための予備試験～

Mechanical Vibration Test on Superconducting Magnet for JR Maglev (2) -Pretest for Simultaneous Vibration of Propulsion Mode and Levitation Mode-

脇 耕一郎, 清野 寛, 岩松 勝(鉄道総研)

WAKI Koichiro, SEINO Hiroshi, IWAMATSU Masaru (RTRI)

E-mail: waki@rtri.or.jp

1. はじめに

超電導磁気浮上式鉄道用超電導磁石に対して、営業線十五年相当の耐久性を検証した[1]。その耐久性評価方法の深度化を目指して検討を進めている。走行中の超電導磁石に誘起される振動モードは、当研究所所有の機械加振試験装置によって再現できる。先の耐久性検証では、二種類ある振動モードを個別に再現した。それらを同時に再現できれば、試験時間は半減し、効率の良い耐久性検証が可能となる。今回は、両振動モードの同時再現に対する検討結果を報告した[2]。今回は、同時再現を目指して行なった、予備試験結果について報告する。

2. 超電導磁石の二種類の振動モード

走行中の超電導磁石は、推進用と浮上用の二種類の地上コイルから電磁気的な加振を受け、その地上コイルに関係した振動モード(推進モードと浮上モード)が、それぞれ誘起される。それらの振動モードを、機械加振試験装置によって再現する際は、モードの「腹」を加振点にすることが効果的である。このため、先の耐久性検証では、図1に示すように、再現したいモード毎に加振点を選択していた。これに対し、前回の検討において、両振動モードの同時再現のためには、浮上モード再現のための加振点三点を使用すればよいことが判明した。

3. 推進と浮上の両振動モード同時再現のための予備試験

実機は、推進よりも浮上のモード振動数の方が高い。機械加振試験装置は、高調波を重ねた加振が可能なので、両振動モードの同時再現のためには、前回の検討結果に加え、両振動モードの振動数比が整数であればよい。

これまでの機械加振における両振動モードの振動数比は2より大きい。そこで、両振動モードの振動数比を2にするために、超電導磁石に補強梁を取付けることにした。この補強梁の取付けは、「外槽の厚さはモード振動数へ与える影響度が大きい。」という構造解析結果に基づいている。

試験装置上、可能な補強梁を作製して超電導磁石に取付け、図2に示すような予備試験を実施した。補強梁を超電導磁石の表側に取付けた場合には、浮上のモード振動数が下がり、裏側に取付けた場合には、推進のモード振動数が上がり、両側に取付けた場合には、両者の重ね合せとなった。従って、両側に取付けた場合が最も効果的であり、両振動モードの振動数

比は2.42から2.19へと小さくなり、2に近付くことができた。

4. まとめ

前回の検討結果と合わせ、推進と浮上の両振動モードを同時に再現する見込みが立った。これより、超電導磁石の効率良い耐久性検証が可能となる。

本研究は国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

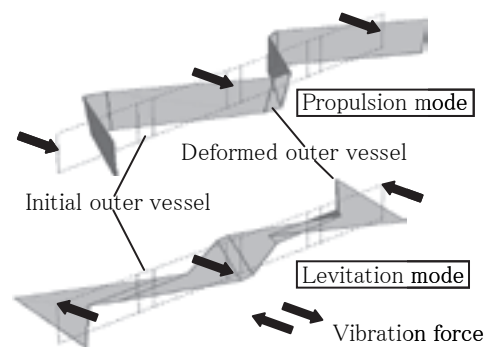


Fig.1 Vibration mode of superconducting magnet obtained from vibration test.

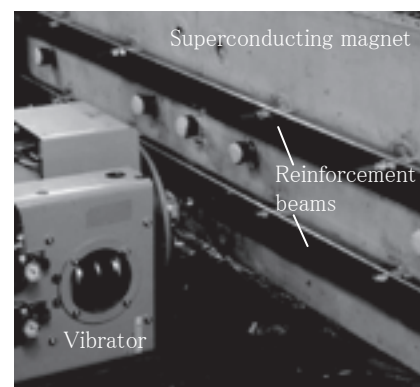


Fig.2 Reinforcement beams arranged to superconducting magnet for vibration test.

参考文献

1. A. Inoue, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 72 (2005) p.238
2. K. Waki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.85

バルク磁石を用いた磁気分離によるめっき廃液中のニッケルの回収

Collecting Nickel Element from Waste Solution of Plating Process by Magnetic Separation with Bulk Magnet

金山 隼人, 田中 克昌, 小林 遼, 福井 聡, 小川 純, 大泉 学, 岡 徹雄(新潟大); 山口 貢(超電導機構); 寺澤 俊久(イムラ材研); 辻村 盛夫(愛知技研)

KANAYAMA Hayato, TANAKA Katsuyoshi, KOBAYASHI Ryo, FUKUI Satoshi, OGAWA Jun, OHIZUMI Manabu, OKA Tetsuo(Niigata Univ.), YAMAGUCHI Mitsugi(Japanese Superconductivity Organization CO.,Ltd), TERASAWA Toshihisa(IMRA Material), TSUJIMURA Morio(Aichigiken CO.,Ltd)

E-mail: f07e072c@mail.cc.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

無電解ニッケルめっきは複雑な形状の製品にも均一に被膜し、防錆は勿論耐食性や硬度に優れることから電子産業や自動車産業において広く利用されており、それに伴い使用済みめっき液の処理が大きな問題になっている。現在、これらは沈殿法により処理されているが、ニッケルを回収して再利用するための新たなプロセスの確立が望まれている。

ニッケルは水溶液中のイオンの状態では磁性を持たないが、沈殿などの化合物になればわずかに磁性を有するので、本研究ではニッケルの磁性に注目し、超伝導バルク磁石の特徴である強力な磁場と急峻な磁場勾配を用いて磁気分離を行った。

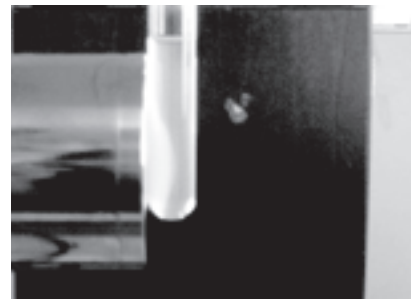


Fig.1 Deposition adsorbed by bulk magnet

2. 実験方法

無電解ニッケルめっき廃液(以後、めっき廃液と略す)に対し水酸化ナトリウムを添加し、pH をアルカリ性に振ると沈殿が生ずる。これはめっき廃液中に存在するニッケルイオンと亜リン酸イオンが結合し、亜リン酸ニッケルとして沈殿したものであり、Fig.1 に示すように磁性を有する。この沈殿を磁気分離を用いて取り除くことで無電解めっき処理における老廃物である亜リン酸をめっき廃液から除去し、磁気分離処理水をめっき液として再利用することができる。Fig.2 にイオンクロマトグラフィーを用いて①めっき廃液、②水酸化ナトリウムを用いて沈殿させた上澄み、③硫酸第二鉄を用いて沈殿させた上澄み、それぞれの液中の含有率を示す。①～③へ進むにつれて液中の亜リン酸が減少しており、亜リン酸が沈殿したということが理解できる。

	①	②	③
phosphoric acid	0.42%	0.14%	0%
phosphorous acid	39.99%	24.91%	7.60%
hypophosphorous acid	16.83%	24.71%	5.53%
chlorine	0.40%	24.82%	0.98%
sulfate ion	42.31%	24.90%	85.78%

Fig.2 Content percentage measured by ion chromatography

Fig.3 に磁気分離実験の模式図を示す。実験に用いた処理液はめっき廃液を 10 倍に希釈したものを 6L 作り、硫酸第二鉄を 60mL 添加し、水酸化ナトリウムで pH 調整を行い、沈殿ができたところで粒子体積を大きくするためにアニオン凝集剤を 60mL 添加したものである。磁気分離部分には高勾配磁気分離の欠点であるフィルタの目詰まりを解消すべく、磁極部分への移動と電磁弁の開閉を同期することで磁気分離と圧縮空気によるフィルタ洗浄を交替で交互に行える二系統の磁気分離配管を用いた。フィルタは SUS430 ポールで直径が 1mm と 3mm のものを用いた。磁場は 44K で 3.1T (バルク表面) 片極で行った。

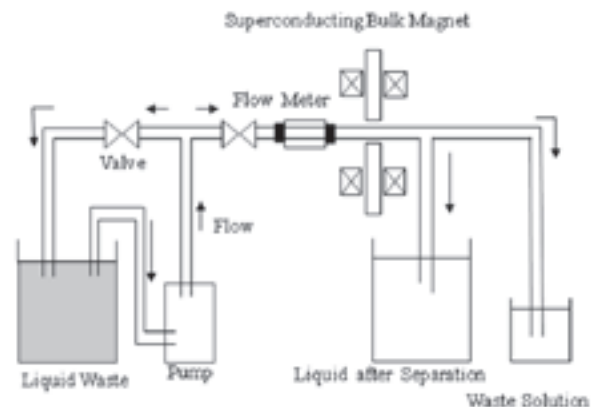


Fig.3 A setup of magnetic separation system for waste water

3. 実験結果及び検討

Fig.4 に実験処理液中のリンの流量一濃度特性を示す。硫酸第二鉄により沈殿させたその上澄みのリン濃度は 4621ppm であり、1~2L/min の流量でその濃度に近づけることができ、これによってめっき廃液から亜リン酸を除去し、処理水をめっき液として再利用できる可能性を示唆した。ただし、硫酸第二鉄による処理ではニッケルもすべて沈殿してしまうため、亜リン酸を除去するには有用な方法であるが、ニッケルを再利用するのは困難である。

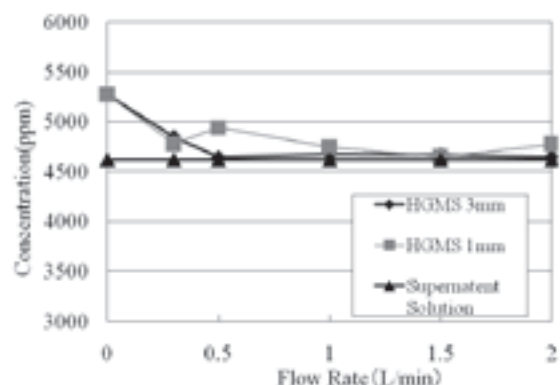


Fig.4 Concentration of phosphorous vs. flow rate

超伝導バルク磁石を用いた水溶性切削油廃液の磁気分離実験

Magnetic Separation Experiment for Waste Water of Cutting Oil by Superconducting Bulk Magnet

田中 克昌, 金山 隼人, 小林 遼, 福井 聡, 小川 純, 大泉 学, 岡 徹雄(新潟大学)
山口 貢(超電導機構); 寺澤 俊久(イムラ材研)

TANAKA Katsuyoshi, KANAYAMA Hayato, KOBAYASHI Ryou, FUKUI Satoshi, OGAWA Jun, OIZUMI Manabu,
OKA Tetsuo (Niigata University); YAMAGUCHI Mitsugi(Japanese Super-conductivity Organization Co.Ltd);
TERASAWA Toshihisa (IMRA Material Co.Ltd)
E-mail: F08E073F@mail.cc.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

工作機械による金属加工には大量の水溶性切削油が使用されている。現在の水溶性切削油廃液の処理には大きな処理施設や費用が必要である。この処理に高勾配磁気分離 (HGMS) と超伝導バルク磁石を組み合わせた技術を導入することで、小型分散型の廃水処理が可能になり、廃液処理上の諸問題を緩和することができると考えられる。本研究では超伝導バルク磁石を用いた磁気分離の性能や有用性を評価し使用用途に見合った方法を見つけ出すことを目的として、実際の廃水処理工程における試料水を対象にバルク磁石装置の分離浄化性能を評価した。

2. 実験方法

Sm 1 2 3 系超伝導バルク体 (φ 65mmx15mm) を搭載したバルク磁石を対向配置(Fig.1)し、パルス電源により励磁し、各バルク表面に 45K で 3.1T, 2.7T, 35mm ギャップの磁極間中央に 1.0T の磁場を得た。この磁場空間に水溶性切削油廃液に凝集剤を添加して油分をフロック化し、油分と水分を分離したものにマグネタイト(Fe_3O_4)を添加することによりフロックに担磁を行い、これを磁気分離により除去するという方法を行なう。実験は新たに製作した交替型磁気分離装置 (Fig.2) を使用し、磁性ステンレス球 1mm, 3mm (SUS430C) を体積率 65% で充填した高勾配磁気分離(HGMS)で流量を変化させその処理性能を測定した。また最大発生磁場 0.306T の永久磁石型の磁選機による処理を測定し比較を行った。処理性能を評価する指標として化学的酸素要求量(COD)を測定した。COD は生物化学的酸素要求量(BOD)と併せて排水基準に用いられている。

3. 実験結果および考察

Fig.3 にバルク磁石による交替型磁気分離装置を用いた HGMS の分離率の結果を示す。分離率の定義として被処理水の上澄み部分の COD 値を基準とした。処理流量が 3 L/min 以下ではほぼ 100%の浄化ができ、被処理水の COD を 17ppm 以下に抑えることができた。磁選機では処理流量 5 L/min 以上では処理性能が低下しているが交替型磁気分離装置では磁選機よりも数倍大きな流量を処理できると推測される。その検証のためにさらに大きな流量でのバルク磁石の性能評価が今後の課題である。

またこの方法のように水中に分散している物質をフロック状にすることで磁気分離が行えると考えられる。このことは超伝導バルク磁石での磁気分離の応用の範囲を広げることが出来ることを示している。

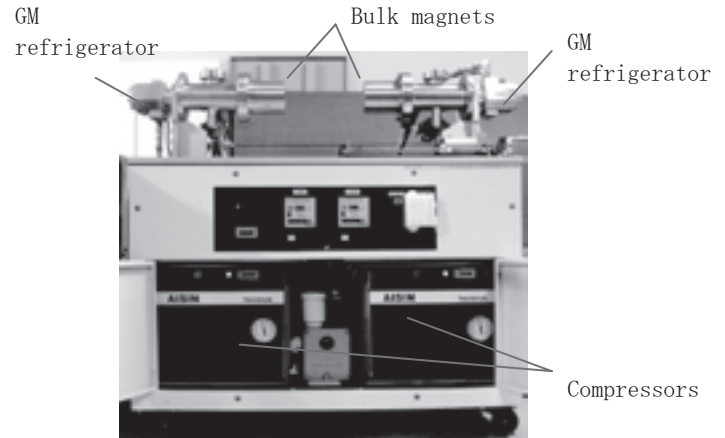


Fig.1 A face-to-face type superconducting magnetic field generator

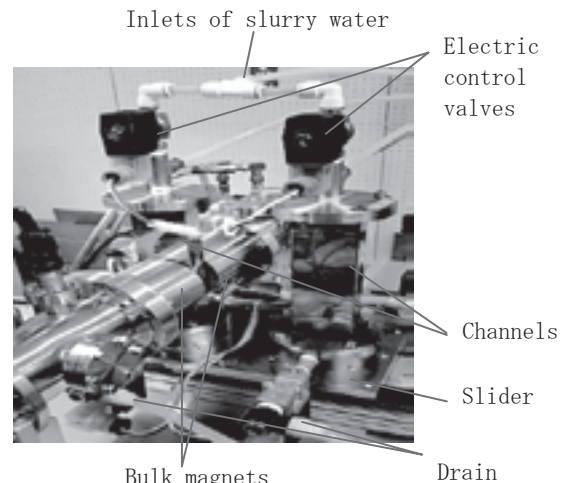


Fig.2 A view of alternate magnetic separation system

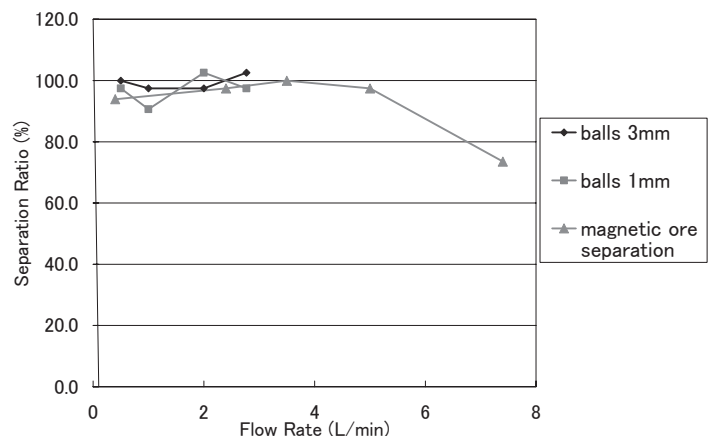


Fig.3 Separation ratios vs. flow rates of waste water of cutting oil for balls and magnetic ore separation

難生分解性廃水の標準的な浄化法としての磁化活性汚泥法の可能性

Possibility of magnetic activated sludge process as standard purification method to poor-biodegradable wastewater

酒井 保藏, 正法地 美奈, 飯村 兼一(宇都宮大); サハ ミヒ ラル(ダッカ大)
SAKAI Yasuzo, SHOHOJI Mina, IIMURA Ken-ichi (Utsunomiya Univ.); SAHA Mihir Lal (Dhaka Univ.)
E-mail: sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、1988年より磁化活性汚泥法を提唱し、研究をおこなってきた。これは、微生物フロックに強磁性粉を吸着させ、磁気分離する方法である¹⁾。運転管理が簡単で余剰汚泥を抑制できる利点をもつ。また、活性汚泥法では適応困難であった難分解性廃水の浄化プロセスに広く活用できる可能性をもつ。本発表では、難分解性廃水の標準的な浄化法として磁化活性汚泥法の可能性をこれまでの種々の難分解性廃水処理の研究成果から議論したい。

活性汚泥法とは、微生物の有機物資化能力を活用した水処理法である。有機廃水の浄化法としてランニングコストが低く、浄化率も高いため広く普及している。しかし、運転管理が難しいこと、増殖した微生物(余剰汚泥)の処分の問題など、どこでも、誰でも使える水処理法としては改善の余地があり、特に、難分解性廃水に対して適応性が乏しいとされている。

2. 磁化活性汚泥法による難生分解性廃水の浄化の原理

一般的な活性汚泥法では毎日20%程度の微生物が余剰汚泥として引き抜かれ、増殖の遅い微生物は増殖困難である。また、難分解性物質が糸状菌の増殖を誘引し、バルキングにより沈降分離できなくなるケースもある。

一方で、磁化活性汚泥法では、原則的に余剰汚泥を引き抜かないため、反応槽中での微生物滞留時間は無限大となる。増殖の遅い微生物であっても、難分解性物質を資化できれば、曝気槽中で時間をかけて増殖でき、その結果、その難分解性廃水に対する浄化プロセスとしての能力が高まってゆくと考えられる。また、工場排水では生産計画によって難分解性有機物が断続的に流入するといったこともよく起こる。一般的な活性汚泥法では1~2週間で微生物が入れ代わってしまい、難分解性有機物の資化菌を保持できないが、磁化活性汚泥法は、微生物を長く反応槽に留めるため断続的な難分解性有機物の流入にも対応できると考えられる。

3. 種々の難生分解性物質合成廃水における処理

本研究室では以下に示すように様々な難生分解性廃水について、磁化活性汚泥法による浄化処理を検討した。

<界面活性剤含有廃水(洗剤廃水)> 通常の活性汚泥法による処理では曝気による発泡で、処理困難になることが予想された。シャンプーを希釈した合成廃水を調製し、磁化活性汚泥法のベンチスケールでの水処理実験をおこなった。容積負荷は0.45g-COD_{Cr}/(L・d)とした。有機物の処理指標としてのCOD_{Cr}除去率はおおよそ90%であった。処理水の透過率は高濃度廃水を長い滞留時間で処理した期間には約90%、低濃度廃水を短い滞留時間で処理した期間には約98%であった。懸濁物質の少ない、透明な処理水が得られた。発泡も抑制され、維持管理が容易で、実験期間中は余剰汚泥ゼロエミッションでの水処理を達成できた。

<ポリビニルアルコール(PVA)含有廃水> 製糸、織物工場では糊料として用いられるPVAを含む廃水が排出されることが多い。合成高分子であるPVAは難生分解性物質であり、

活性汚泥法で処理されにくい。そこでPVAの磁化活性汚泥法による分解処理を試みた。

PVA(重合度2000)を熱湯で溶かして糊状にした。これを水道水で希釈し無機栄養塩を加え合成PVA廃水とした。これを磁気分離装置に容積負荷0.40g-COD_{Cr}/(L・d)で投入して処理をおこなった。装置の水温は25℃一定とした。COD_{Cr}除去率は90%以上、流出水の透過率97%以上、SS5mg/L以下と良好な処理ができた。またPVAが微生物により分解されているか確認するために、DO(溶存酸素濃度)の経時変化をDO計により測定したところ、微生物の酸化分解を受けていると推察された。本実験においても、難生分解性とされるPVAが簡単に処理でき、また、余剰汚泥ゼロエミッションも達成できた。

<環境ホルモン含有廃水> ビスフェノールA(BPA)やフタル酸ジエチルは微量でも水棲生物に影響する内分泌攪乱物質としての可能性が指摘されてきたが、生分解を受けにくい物質でもある。これらの物質の分解処理について磁化活性汚泥法を検討した。

BPAを主成分とする合成廃水を用いて実験をおこなった。容積負荷は0.12~0.24g-COD_{Cr}/(L・d)とした。BPAの分解を確かめるため、ベンゼン環の吸光度ピークからBPA濃度を求め、除去率を算出した。実験開始直後、BPAはほとんど分解できなかったが、10日後には吸収ピークが低下し、ベンゼン環も分解されていることが示され、80%程度分解されるようになった。馴養が進むにつれて、除去率が改善されたと考えられる。フタル酸ジエチルについても同様な結果を得た。

環境ホルモンについても簡単に分解処理でき、余剰汚泥ゼロエミッションが可能であることが示された。

<フェノール含有廃水> フェノール含有廃水はバルキングしやすくとされる難生分解性廃水である。磁化活性汚泥法による浄化処理実験では断続的なフェノールの流入に対する生分解特性も検討した。

フェノール廃水の処理についても良好なCOD_{Cr}除去率が得られた。また、数週間、易分解性の合成廃水を処理した後、再度、フェノール廃水を処理した場合も、通常の活性汚泥法が対応できず、COD_{Cr}除去率が低下したのに対して、すぐにフェノールの分解を再開することができ、磁化活性汚泥法は断続的な難生分解性物質の流入に対しても柔軟に対応できることが示された。

4. おわりに

磁化活性汚泥法は比較的低負荷条件で、様々な難生分解性廃水を簡便かつ余剰汚泥ゼロエミッションで分解でき、標準的な浄化法として利用できる可能性が示された。

謝辞: 本研究は科学研究費基盤研究(A)1820101の支援を受けた。

参考文献

1. Chemical & Engineering News (<http://pubs.acs.org/cen/news/83/i52/8352wastewater.html>)

Pb 組成を変えた Bi-2223 多芯テープの臨界電流特性の評価

Evaluation of critical current in multifilamentary Bi-2223 tape with different lead composition

上野俊輔, 高山伸一, 木内 勝, 小田部荘司, 松下照男(九工大);
 綾井直樹, 菊地昌志, 林和彦, 佐藤謙一(住友電工)

UENO Shunsuke, TAKAYAMA Shinichi, KIUCHI Masaru,
 OTABE Edmund S, MATSUSHITA Teruo(Kyushu Institute of Technology);
 AYAI Naoki, KIKUCHI Masashi, HAYASHI Kazuhiko, SATO Ken-ichi(Sumitomo Electric Industries, Ltd.)
 E-mail: shunsuke@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

1. はじめに

現在、Bi-2223 銀シーステープ線材において最終焼結プロセス時に加圧焼結処理 (Controlled Over Pressure : CT-OP) を行うことにより、従来の大気圧焼結処理に比べて高い臨界電流 I_c が得られることが報告されている¹⁾。加圧焼結法も改良を重ねられ、更なる最適化が進み臨界電流は飛躍的に向上した。また、最近では加圧焼結法の改善だけでなく、Bi-2223 テープの Pb 組成を変えることにより特性の改善を検討している。そこで、本研究では加圧焼結法により作製された Pb 組成の異なる Bi-2223 テープ線材の臨界電流特性を調べ、臨界電流密度 J_c や不可逆磁界 B_i を比較検討した。

2. 実験

実験に用いた試料は PIT 法により作製された Bi2223 多芯テープ線材で、いずれも最終焼結時に加圧焼結法を用いて作製されている。Table. 1 に各試料の 77.3 K における自己磁界中での I_c と Pb 組成条件を示す。測定には直流四端子法を用い、テープ面に対して垂直方向と平行方向に磁界を印可して測定した。電界基準 $E_c = 1.0 \times 10^{-4}$ V/m として臨界電流密度 J_c を決定した。また、不可逆磁界は $J_c = 1.0 \times 10^7$ A/m² となる磁界で定義した。

Table. 1: Specifications of specimens

試料	I_c [A]	Pb 組成条件
#1	94	定比
#2	99	Pb8% 低減組成
#3	85	Pb16% 低減組成
#4	146	Pb15% 増加組成

3. 結果及び検討

Fig. 1 にテープ面に対して垂直に磁界を印可したときの 77.3 K における臨界電流密度の磁界依存性を示す。低磁界領域においては I_c の高い #4 の J_c が最も高い値であり、 I_c の低い #3 の J_c が最も低い値となった。また Bi も #4 が最も高い値となっていることから Pb 組成を増やすことによって Bi が向上していると考えられる。しかし、高磁界領域においては #3 と #4 の差が小さくなっている。したがって、垂直磁界下では磁界による劣化は #3 が良く、#4 は悪いことが分かる。一方、テープ面に対して平行に磁界を印可したときの 77.3 K における臨界電流密度は #4 が最も大きい値となり、#3 が最も小さい値となった。また、磁界による劣化も #4 が良く、#3 が悪い結果となった。

Fig. 2 には J_c の異方性の大きさ $J_c(0^\circ)/J_c(90^\circ)$ の磁界依存性を示す。磁界角度はテープ面に平行な方向から測っている。この結果から #4 の異方性が最も大きく、#3 の異方性が最も小さいことが分かる。したがって、#4 では Pb 増加組成による異方性の低下よりも結晶配向の向上による影響が大きく、結果的に異方性が大きくなったと考えられる。これが垂直磁界下で #4 の磁界による劣化が大きかった原因であると

思われる。一方、#3 は異方性が小さい値となっており、Pb 量低減による異方性の増加よりも結晶配向の低下の影響によるものと思われる。

臨界電流密度の磁界依存性について、磁束クリープ・フローモデルを用いて解析を行った。その結果、#4 のピン力が垂直磁界、平行磁界ともに高い値となり、このことが #4 の高い J_c 値を与えている。このピン力の増加は Pb 添加によるキャリアのドーピングによって凝縮エネルギー密度が向上したことによるものと考えられる。また、ピン力のばらつきも #4 の値が最も小さい値となっており、結晶配向が向上しているという予想を支持している。

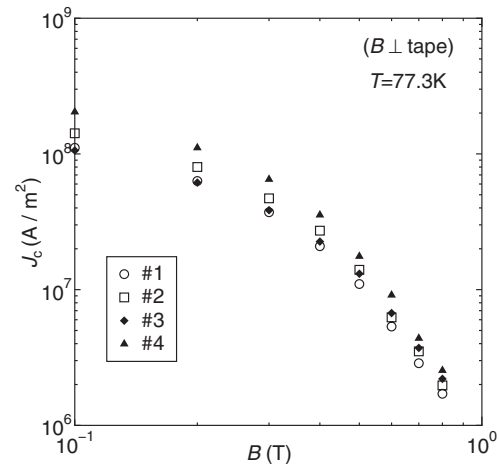


Fig. 1: Critical current density in a normal magnetic field at 77.3 K

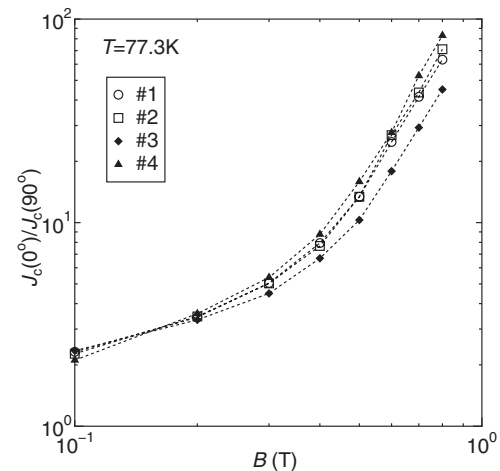


Fig. 2: Field angle anisotropy of critical current density at 77.3 K

参考文献

- 1) S. Kobayashi et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 15 (2005) 2534.

加圧焼成法により作製された Bi2223 線材の電流輸送特性

Transport characteristics in Bi2223 wire fabricated by CT-OP process

井上 昌睦, 本山 皓士, 木須 隆暢(九大); 綾井 直樹, 菊池 昌志, 林 和彦, 佐藤 謙一(住友電工); 田中 靖三(ISTEC 標準部); 中尾 公一, 塩原 融(SRL-ISTEC)

INOUE Masayoshi, MOTOYAMA Koji, KISS Takanobu (Kyushu Univ.); AYAI Naoki, KIKUCHI Masashi, HAYASHI Kazuhiko, SATO Kenichi (SEI); TANAKA Yasuzo (Standardization Dep., ISTEC); NAKAO Koichi, SHIOHARA Yuh (SRL, ISTEC)
E-mail: inoue@ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

加圧焼成法と呼ばれる焼成プロセスを適用することにより従来性能を超える臨界電流特性を有する Bi2223 線材が得られている¹⁾。本研究では、同線材の電流-電圧特性の、温度、磁場、磁場印加角度依存性を実験により詳細に調べるとともに、パーコレーションモデルに基づくピンニング特性の解析を行うことによって、特性向上の機構について考察を行った。さらに、任意の動作条件における電流輸送特性の定式化についての検討を行った。

2. 実験

試料は、線材幅を細くしたスリム型 (Type-S²⁾) 線材で、線材の幅及び厚みは、それぞれ 2.6mm 及び 0.18mm となっている。また、77K、自己磁場での I_c は 71A である。同線材の電流-電圧特性を、4.2K~77K の温度領域、自己磁場~12T の磁場領域、0~90 度の角度領域に亘り系統的に調べた。

3. 実験結果及び考察

Fig.1 に、実験により得られた電界-電流密度 (E - J) 特性から求めた工学的臨界電流密度 $J_e (=I_c / \text{線材断面積})$ の温度、磁場依存性を示す。磁場の印加方向は線材面に垂直であり、電界基準は $1\mu\text{V}/\text{cm}$ である。磁場中の J_e 特性は温度の低下とともに向上し、77K、自己磁場の $J_e (=J_{e,77K,sf})$ を基準にすると、20K、12T では $J_{e,77K,sf}$ の 2/3 程度の J_e が、4.2K、12T では約 2 倍の $J_e (\approx 3 \times 10^8 \text{A}/\text{m}^2)$ が得られていることが分かる。この値は 140A の電流値に相当し、1cm 幅あたりに換算すると約 600A/cm となる。

実験で得られた E - J 特性を用いてパーコレーションモデルに基づくピンニング特性の解析を行った。同モデルにおいては、臨界電流密度の統計分布パラメータの温度、磁場依存性を求めることにより、任意の温度、磁場における電流輸送特性の定式化が可能となる。また、角度依存性は、転移磁場 B_{GL} の角度依存性を求めることにより推定可能となる。ピスマス線材の B_{GL} の異方性は、intrinsic な特性から予想される値に比べると低いが、これは、フィラメントの配向の乱れを反映していると考えられる。この乱れを考慮し、転移磁場の角度依存性を求めたのが、Fig.2 である。得られた結果を、従来線材³⁾と比較すると、 B_{GL} の異方性が 5.7 から 7.4 程度まで増大していることが分かる。このことは、線材内のフィラメントの配向性が向上していることを示唆しており、加圧焼成に伴う配向性の改善が高 J_e 化に結びついていると考えられる。

解析により得られたピンパラメータを用いて J_e - B - T - θ 特性を求めた結果の例を Fig.3 に示す。このような任意の温度、磁場、磁場印加角度における電流輸送特性を推定する手法は、Bi2223 線材の各種応用機器の設計・開発において有用である。電流輸送特性及びピンニング特性の解析結果の詳細については当日報告する。

謝辞

本研究は、超電導応用基盤技術研究開発の一環として、ISTECを通じて、NEDOからの委託を受けて実施するとともに日本学術振興会の科研費(18360153)の助成を得て行ったものである。

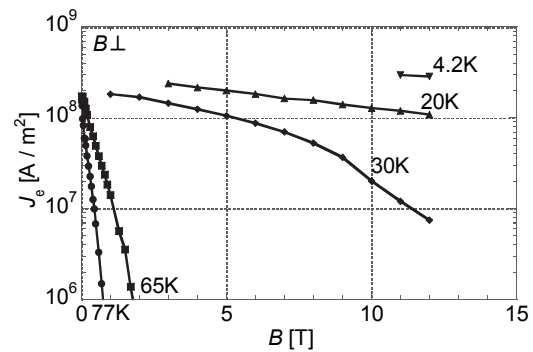


Fig.1 J_e - B - T characteristics in $B \perp$ tape surface.

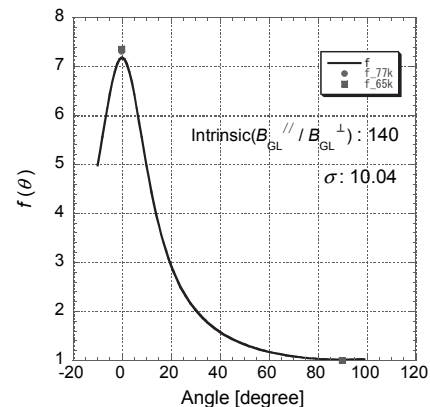


Fig.2 Angular dependence of transition field ratio, $f(\theta)$.

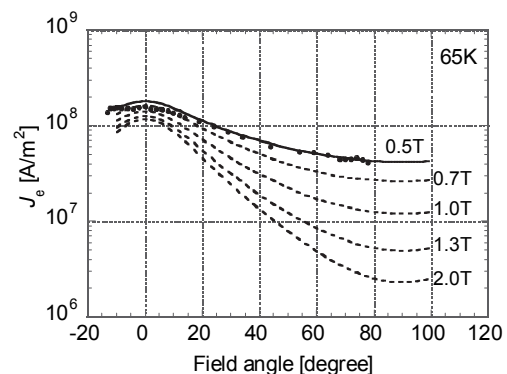


Fig.3 Angular dependence of J_e at 65K. Symbols and solid lines are experimental data and analytical expressions, respectively.

参考文献

1. M. Kikuchi, et al.: Abstract of CSJ Conference, Vol. 74 (2006) p.24
2. T. Ishida, et al.: Abstract of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.56
3. T. Kiss, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 11 (2001) pp.3900-3903

フィラメント間バリアを有する Bi2223 ツイスト線材の交流損失特性

AC loss characteristics in twisted Bi2223 tapes with interfilamentary barriers

稲田 亮史, 光野 克紀, 荘口 和真, 中村 雄一, 太田 昭男 (豊橋技科大); 李 成山, 張 平祥 (西北有色金属研究院)
 INADA Ryoji, MITSUNO Yoshiki, SOGUCHI Kazuma, NAKAMURA Yuichi, OOTA Akio (TUT);
 LI Chengshan, ZHANG Pingxiang (NIN)
 E-mail: inada@eee.tut.ac.jp

1. はじめに

我々は、Bi2223 線材の低交流損失化に向けて、フィラメント間に酸化バリア層を導入した線材の作製と交流特性の評価を行っている。これまでの研究では、バリア導入による通電特性の劣化を抑制するために、 $\text{Ca}_2\text{CuO}_3 + \text{Bi2212}$ (20wt%) 混合バリアを導入した線材の作製と評価を行ってきた^[1,2]。その結果、通電特性の劣化は 10%程度に抑制することができるが、焼成後にバリア層の連続性が低下する問題があった。本研究では、焼成後においてもバリア層の連続性が維持できる $\text{SrZrO}_3 + \text{Bi2212}$ (20 wt%) 混合バリアを導入したツイスト線材を作製し、交流損失特性の評価を行った。

2. 実験方法

バリア入り Bi2223 多芯線材は通常の Powder-in-tube 法により作製した。フィラメントに接するシース材には Ag, 多芯化の際の OUTERシースには Ag-Mn 合金を使用した。所定の線径まで細線化した丸線に対してツイスト加工を施した後、テープ化・熱処理を行った。最終線材の断面寸法は幅 3.8 mm, 厚さ 0.27 mm 程度である。

交流損失測定は 77 K, 磁界振幅 $B_0 = 0.5 \sim 50$ mT の条件においてピックアップコイル法により行った。

3. 結果と考察

作製したバリア入り線材の横断面写真を Fig. 1 に示す。図より、 $\text{SrZrO}_3 + \text{Bi2212}$ バリアの方が $\text{Ca}_2\text{CuO}_3 + \text{Bi2212}$ バリアよりもバリア層の連続性が良好であることが確認できる。通電特性としては、 $\text{Ca}_2\text{CuO}_3 + \text{Bi2212}$ バリア線材において $J_c = 17$ kA/cm² ($L_t = 14$ mm), $\text{SrZrO}_3 + \text{Bi2212}$ バリア線材において $J_c = 15$ kA/cm² ($L_t = 16$ mm) が得られた。

Fig. 2 には、 $B_0 = 0.5$ mT における垂直磁界損失の周波数依存性を示す。測定損失中に含まれる結合電流損失が最大となる特性周波数 f_c に着目すると、バリア層の連続性が悪い $\text{Ca}_2\text{CuO}_3 + \text{Bi2212}$ バリア線材でバリアなし線材 ($L_t = 13$ mm) とほぼ同等の値を示しているが、 $\text{SrZrO}_3 + \text{Bi2212}$ バリア線材は 6-7 倍程度高い f_c を示した。試料間のツイスト長の違いを考慮すると、 $\text{SrZrO}_3/\text{Bi2212}$ バリア線材の横断抵抗率 ρ_{\perp} はバリアなし線材と比較して 8-9 倍程度向上していると推測される。しかしながら、フィラメント間結合を分断し損失低減効果を得るには、 f_c が使用周波数よりも高い必要がある。したがって、50-60 Hz での使用を想定した場合、 $\text{SrZrO}_3/\text{Bi2212}$ バリア線材の f_c は依然として低いということになる。

Fig. 3 には、 $\text{SrZrO}_3 + \text{Bi2212}$ バリア線材の垂直磁界損失の印加磁界振幅依存性を示す。10 mT 以上の測定値は磁界範囲では薄帯モデルの解析値に近い値を示しているが、周波数の増加と共に損失も増加していることが確認された。 f_c 近傍の 30 Hz における損失が最も低い値を示しており、30 Hz では $\text{SrZrO}_3/\text{Bi2212}$ バリア線材内のフィラメント同士の結合は完全でないと推測される。その他の試料では f_c が数 Hz 程度と非常に低く、30 Hz 以上で損失の周波数依存性は観測されなかったことから、フィラメント同士は完全に結合していると考えられる。

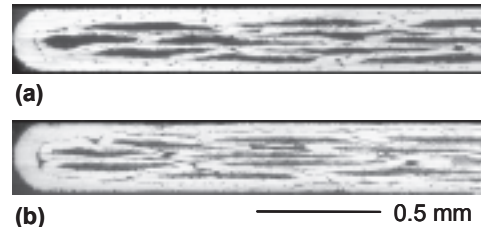


Fig. 1. Transverse cross sectional views of Bi2223 tapes with (a) $\text{Ca}_2\text{CuO}_3 + \text{Bi2212}$ and (b) $\text{SrZrO}_3 + \text{Bi2212}$ barriers.

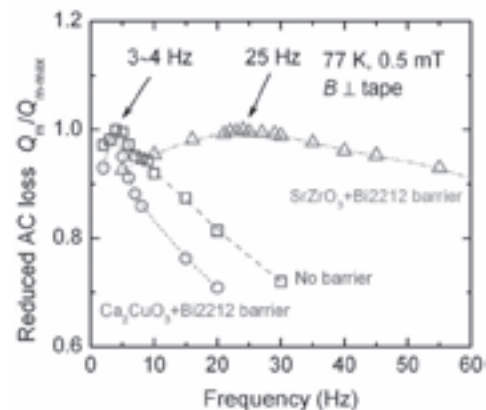


Fig. 2. Frequency dependence of AC losses Q_m at 0.5 mT under perpendicular field for twisted Bi2223 tapes with or without barriers.

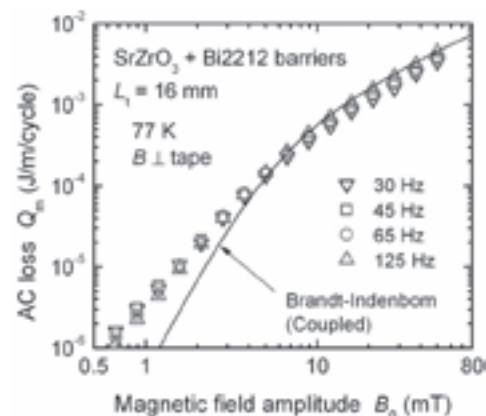


Fig. 3. AC losses Q_m under perpendicular field plotted against field amplitude B_0 for twisted Bi2223 tape with $\text{SrZrO}_3 + \text{Bi2212}$ barriers.

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金 (若手研究(A) No. 20686020), (財)東電記念科学技術研究所研究助成および豊橋技科大未来技術流動センター若手研究者プロジェクト助成の支援により実施された。

参考文献

- [1] R. Inada et al.: Physica C **463-465** (2007) 857.
 [2] R. Inada, et al: J. Phys. Conf. Ser. **97** (2008) 012065.

高温超電導線材評価試験装置の開発 Development of properties measuring system for HTS wire

小方正文, 長嶋賢, 宮崎佳樹, 岩松勝(鉄道総研); 柳瀬康人, 山下知久(東芝)

OGATA Masafumi NAGASHIMAKen, MIYAZAKIYoshiki, IWAMATSUMasaru (Railway Technical Research Institute);
YANASEYasuto, YAMASHITATomohisa (Toshiba Corporation)

E-mail:ogata@rtri.or.jp

1. 背景

RE 系線材(RE-Ba-Cu-O 材料を使用した高温超電導テープ線材)を浮上式鉄道用高温超電導磁石へ適用する概念設計検討を進めている[1][2]。コイル検討の深度化にあたっては、実際に使用する線材の臨界電流 I_c の異方性等の特性を実測して設計検討にフィードバックすることが重要である。そこで、磁場 B (~5.5 T) および温度 T (10 K~)の条件を任意に設定することが可能で、最大 1000 A まで通電可能な高温超電導線材の $I_c - B - T$ 特性評価試験装置を開発したので報告する。

2. 1000 A, 5.5 T 対応可能な $I_c - B - T$ 特性評価装置

表1に本装置の主要性能を、図1に本装置の概念図を示す。超電導コイルが発生する磁場空間へサンプル線材を収納した装置先端部を挿入するもので、サンプル線材は、多角形の断面形状を有する棒状の FRP 製サンプルホルダ(絶縁距離 100 mm)に取り付け、電流経路途中の接続箇所へ外部磁場とサンプルホルダが直交するようにして固定する。サンプルホルダは、長手方向の軸を中心に特定角度で固定することができ、2 段 GM 冷凍機冷却およびヒータ制御により 10 K 以上の任意の温度に設定可能となっている。

Table 1 Specifications of properties measuring system for HTS wires

Current	0 ~ 1000 A
Temperature	10 K ~
Magnetic field	0 ~ 5.5 T
Sample length	100 mm (electrodes distance of holder)
Field angle	0°, 30°, 45°, 60°, 90° (to c-axis)

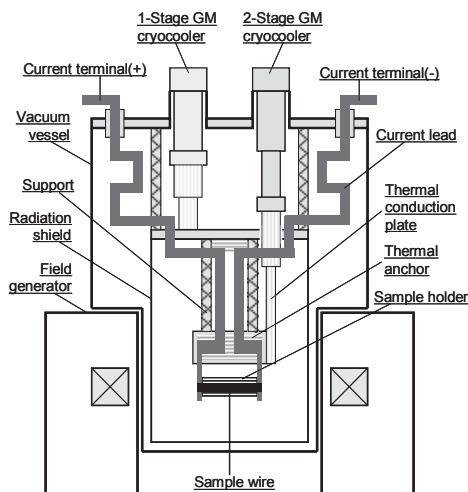


Fig.1 Schematic diagram of properties measuring system for HTS wires

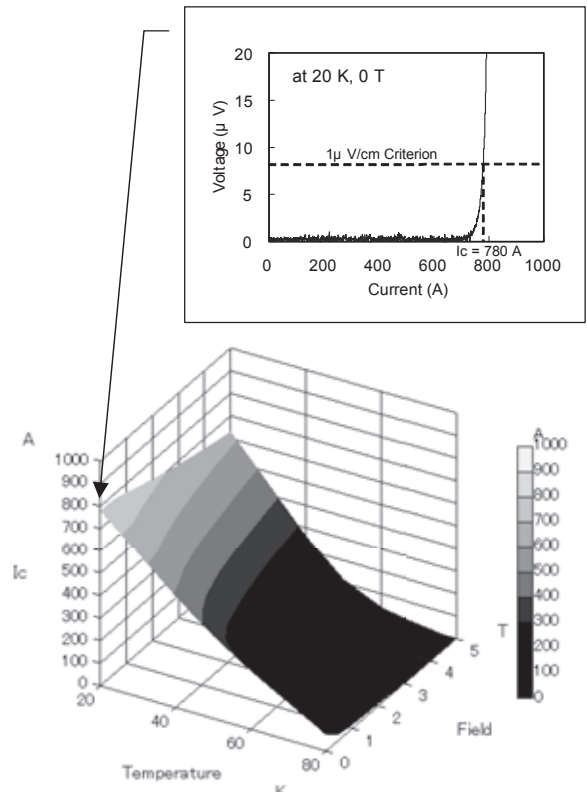


Fig.2 Test result of I_c profiles on temperature and field for a commercial HTS wire ($B \perp c$)

3. 試験結果例

図 2 に市販高温超電導線材を用いた試験結果の例を示す。約 100 mm 長の実線材をサンプルとし、設定温度および印加磁場 ($B \perp c$) をパラメータとして得られた臨界電流値 ($1 \mu V/cm$ 基準) を三次元的に表したものである。

4. 本装置で評価可能な諸物性

今後も本装置を用いた線材特性評価を進め、実用システムへの RE 系線材の適用検討に活用していく。

また線材の他にも、Al や Cu 等、超電導磁石構成上必要な金属材料について、本装置で通電特性を評価することで、電気抵抗率の他、Wiedemann-Franz 則から熱伝導率も見積もることが可能であるため、実際の使用環境を想定した金属材料の電気特性、熱特性評価にも有効に活用できると考えている。本研究は国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

参考文献

1. K.Nagashima et al.: Abstracts of CSJ Conf., Vol.7 6 (2007) p.84
2. K.Nagashima et al.: Abstracts of CSJ Conf., Vol.77(2007)p.176

ピン止め力の異なる高温超伝導バルクのパルス着磁特性

Pulse magnetization properties of high-temperature superconducting bulks with different flux pinning forces

山田 博, 軍神有由美 (大島商船高専);

安達基弥, 柴田あゆみ, 中野磨希, 平地克也, 中川重康, 金山光一 (舞鶴高専)

YAMADA Hiroshi, Gunshin Ayumi (Oshima National College of Maritime Technology);

ADACHI Motoya, SHIBATA Ayumi, NAKANO Maki, HIRACHI Katsuya, NAKAGAWA Shigeyasu, KANAYAMA Kouichi, (Maizuru National College of Technology)

E-mail : yamadah@oshima-k.ac.jp

1. はじめに

希土類高温超伝導バルク体は、テスラ級の磁場をコンパクトに発生でき、線材や厚膜とは異なる発想に基づいた新しい応用が期待されている⁽¹⁾。超強力な磁力源として動力装置等に組み込むために、繰返しパルス着磁法⁽²⁾や波形制御パルス着磁法⁽³⁾などが研究されている。本研究では、磁束ピン止め力の大きく異なる2種類のバルク体の繰返しパルス着磁特性を比較した。

2. 実験方法

着磁用のバルク体として新日本製鐵の Dy-123 及び Gd-123 相溶解バルク体(直径 30mm, 厚さ 5mm)を使用した。Fig.1 に本研究で使用したパルス着磁装置の回路図を示す。コンデンサバンクは 56.4 mF で、IGBT スイッチとダイオード D₂ により着磁コイルの電流を一方に整流した。着磁後の捕捉磁場は、バルク中央 0.5mm 高さにホールセンサを取り付けて計測した。着磁は 77.3 K の液体窒素中で行い、繰返し法では初めに 3T を印加し、その後 0.2T 刻みで磁場を減少させた。

3. 実験結果と考察

Dy-123、及び Gd-123 バルクについて、単発のパルス着磁と繰返しパルス着磁を行った結果を Fig3 に示す。Dy-123 バルクでは、捕捉磁場は最大 0.4T となり、着磁法による最大捕捉磁場に差はほとんどな確認されなかった。一方で、Gd-123 バルクでは、単発のパルス着磁で捕捉磁場は最大 0.7 T となり、繰返しパルス着磁では 0.78 T が得られ捕捉磁場は約 10%増加した。Fig.4 に Gd-123 バルクにおける繰返しパルス着磁後の捕捉磁場分布を示す。図中の網掛した領域において、捕捉磁場はやや低下していることが分かるが、その部位を除けばほぼ同心円状で等間隔の等高線分布となった。

4. まとめ

コンデンサと半導体スイッチを用いた簡便な着磁回路を製作し、繰返しパルス着磁を行った結果、磁束ピン止め力の大きな Ga-123 バルクを用いることで、最大で約 10%の捕捉磁場の増加がみられた。

参考文献

- [1] 生田博志ほか, 応用物理, **72**, 6 (2003) 742.
 [2] Y. Yanagi, et al.: Advance in Superconductivity, **10**, 2 (1997) 941.
 [3] T. Ida, et al.: Journal of Physics Conference Series, **43** (2006) 539.

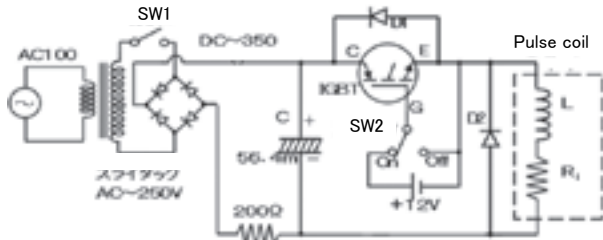


Fig. 1. Electric circuit for the pulse field magnetization.

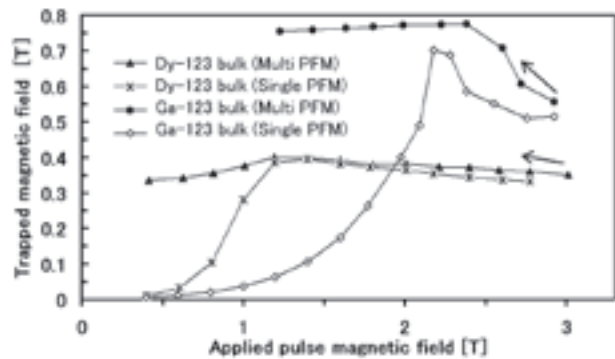


Fig. 2. The applied pulse field dependence of the trapped field of the Dy-123 bulk and Ga-123 bulk.

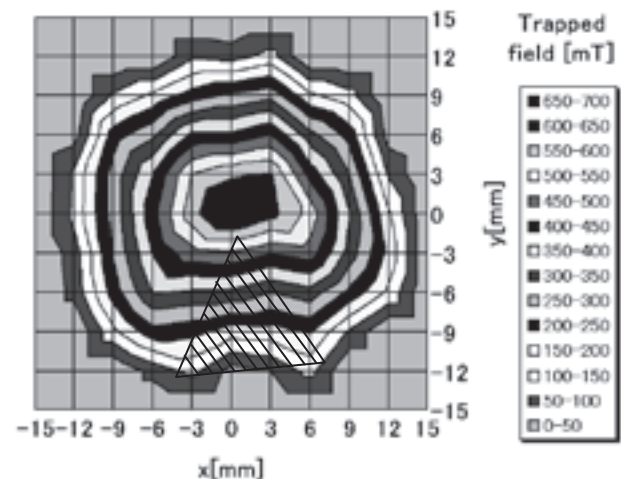


Fig. 3. Distribution of the trapped magnetic-flux density of Dy-123 bulk after the multi-pulse magnetization of 2.4 T.

有限要素法を用いた第三高調波電圧誘導法測定時における n 値の影響FEM analysis on effects of n value in the third harmonic voltage measurement method吉田 信之, 吉田 貴昭, 岩本 賢太郎, 小田部 莊司, 松下 照男(九工大);
岡本 洋(九州電力)YOSHIDA Nobuyuki, YOSHIDA Takaaki, IWAMOTO Kentarou, OTABE Edmund Soji,
MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.); OKAMOTO Hiroshi (Kyushu Electric Power Co., Inc.)

E-mail : nobuyuki@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

はじめに 近年、超電導体を用いた製品の実用化に伴い、超電導体の長尺化が進んでいる。長尺超電導線材の臨界電流密度 J_c を効率よく測定する方法が必要とされているが、本研究では非破壊非接触で測定可能な第三高調波電圧誘導法に着目した。第三高調波線圧誘導法は超電導薄膜の直上に設置したコイルに交流電流 $I_0 \cos \omega t$ を通電し、コイルの発生磁界を遮蔽する超電導薄膜の電流によりコイルに誘導される電圧の中に第三高調波成分 V_3 が発生しはじめる電流値 I_{th} により J_c を求める方法である¹⁾。しかし I_{th} 以下での電流値においても V_3 はわずかに発生しており、 V_3 の発生を正確に検出することは困難である。そこで本研究では、電界 E が電流密度 J の n 乗に比例する n 値モデルを用いた有限要素法による数値解析²⁾ によって求めた V_3/I_0 - I_0 曲線に対して、四端子法の測定でよく用いられている off-set 法を用いて I_{th} を求めた。また、 I_{th} 周辺での超電導体内部の磁束密度や電流密度の分布を解析することで、第三高調波電圧誘導法によって求まる J_c の妥当性を検証した。

実験 本研究の解析で用いたコイルと超電導薄膜の概要を Fig.1 に示す。Fig.1 の解析部分を JMAG Studio 9.0 を用いて解析した。コイルの巻き数は 400 回、電界基準 E_c は 1.0×10^{-4} V/m、臨界電流密度 J_c は 2.6×10^{10} A/m²、超伝導 - 常伝導転移の鋭さを示す n 値は 10 ~ 40 の範囲で変化させた。コイルに通電した電流の周波数は 1000 Hz であり、3 周期分を計算して波形の安定する 3 周期目を解析に用いた。

結果及び検討 図 2 に n 値が 10, 20, 30, 40 の時の V_3 - I_0 特性を示す。図中の挿図は $n = 30$ の時の V_3/I_0 と I_0 の関係で、傾きの変化が顕著な電流値 0.10 A から 0.18 A の範囲の特性を示している。さらに off-set 法によって I_0 が十分に小さい領域から引いた接線と V_3/I_0 が $50 \mu\Omega$ となる点付近から引いた接線の交点より、 I_{th} を 0.140 ± 0.002 A とした。求めた I_{th} より計算して得られた J_c は $(2.63 \pm 0.04) \times 10^{10}$ A/m² となり、これは 2.6×10^{10} A/m² に対して誤差 -0.39 ~ 2.7% となっている。他の n 値でも同様の計算をしたところ、 $n = 40$ の時に I_{th} は 0.138 ± 0.001 A となり、得られた J_c は、 $(2.59 \pm 0.020) \times 10^{10}$ A/m² で誤差は -1.2 ~ 0.39% となり、 $n = 30$ の時と比較すると誤差の範囲は減少している。一方 n 値が 30 よりも減少するにつれ J_c の誤差は増加し、 $n = 20$ の時では -1.5 ~ 9.2%、 $n = 10$ の時では -18 ~ 32% となった。また、 n 値が 20 ~ 30 の間について細かく解析を行ったところ、 $n = 27$ の時に I_{th} が 0.142 ± 0.003 A となり、 J_c が $(2.67 \pm 0.060) \times 10^{10}$ A/m² で誤差が $\pm 5\%$ 以内に収まることになった。

まとめ off-set 法によって求められた J_c は、 n 値が増加するに従い、設定された J_c との誤差が減少する傾向にあることが本研究で明らかになった。誤差の許容範囲を 5.0% 以内とすると、許容範囲内の J_c を得られる n 値は 27 以上であるといえる。また、低い n 値の場合は V_3/I_0 - I_0 曲線がゆるやかに立ち上がるため、off-set 法によって接線を引く際にも n 値が減少するにつれて接線の傾きのばらつきが増加するという傾向が見受けられる。 n 値が小さい場合は接線を決定することが難しく、得られる I_{th} の評価に多大な誤差を含むものと考えられる。以上の考察より n 値が 27 以上であれば、通常四端子法で用いられる電界基準で定める J_c と、同等の決め方ができると考えられる。

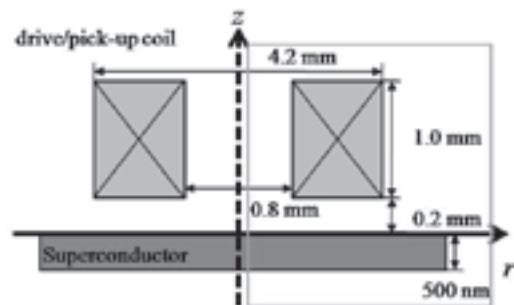
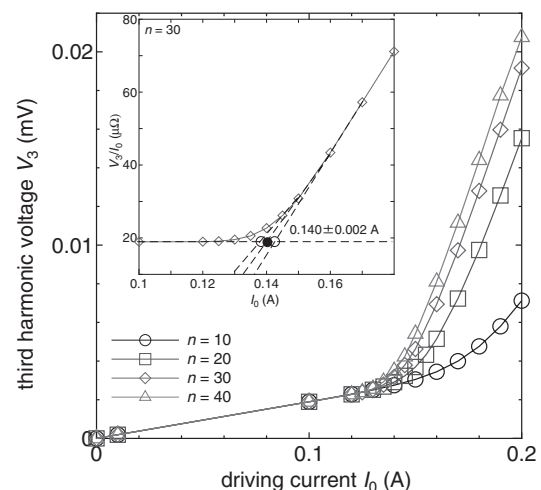


Fig.1 Analytical model.

Fig.2 V_3 - I_0 characteristics.

【参考文献】

- 1) Y. Mawatari, H. Yamasaki, Y. Nakagawa, Appl. Phys. Lett. 81 (2002) 2424.
- 2) S. Honjo, H. Ishii, Y. Sato, H. Hashimoto, T. Yamada, K. Tani, T. IEE Japan, Vol. 120-B, No.11, (2000)

Batch 式焼成プロセスによる Ni-W 基板上 YBCO 長尺線材の作製(2)

-Batch 式本焼による 50m長線材の作製-

Preparation of the YBCO long tapes on Ni-W substrates using a batch-type furnace.

兼子敦、中西達尚、小泉勉、青木裕治、長谷川隆代（昭和電線）；
高橋保夫、和泉輝郎、塩原融（SRL）

KANEKO Atsushi, NAKANISHI Tatsuhisa, KOIZUMI Tsutomu,
AOKI Yuji, HASEGAWA Takayo (SWCC-CS) ;
TAKAHASHI Yasuo, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (SRL)
E-mail:a.kaneko015@cs.swcc.co.jp

1. はじめに

我々は、線材作製プロセスに低コスト化が期待できる有機金属塩熱分解法（MOD法：Metal Organic Deposition Process）を採用すると共に、本焼工程にBatch式焼成法を用いてYBCO線材の開発を行っている。均一に焼成するためには、反応過程で発生するHFガスの発生と排気を制御する事が必要不可欠である。またBatch式焼成法は、焼成条件が決まれば再現性良く焼成することが可能であるという特徴がある。

これまでIon-Beam Assisted Deposition Process (IBAD)法により中間層を形成したIBAD基板上で長尺化の検討を進めてきた。一方、「超電応用基盤技術開発」における線材のコスト目標として¥3/Amという極低コスト線材のコスト目標を達成するために、より低コスト化が期待できるNi-3at%Wの配向Ni金属基板を用いたYBCO線材の長尺化の検討も並行して進めている。

前回、我々は15m長の配向Ni-W基板上にTFA-MOD法でYBCO線材を作製し、 $I_c=135\text{A/cm-width}$ の特性が得られたことを報告した。

本報告では、YBCO線材の更なる I_c 特性の向上と長尺化の検討結果について報告する。

2. 実験方法

Ni-3at%W配向金属基板上に $\text{Ce}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 膜を第一中間層としてMOD法で形成し、さらにその上にRF-Sputtering法にて CeO_2 膜を第二中間層として形成した。この基板上にReel-to-reel式連続Dip-coating法で塗布・仮焼を行い、Y, Ba及びCuの元素で構成される前駆体膜を作製した。塗布に用いた溶液は、YとBaがトリフルオロ酢酸（TFA）塩、Cuはナフテン酸塩を用い、配合比はY:Ba:Cu=1:1.5:3とした。

線材をドラムに螺旋状に巻き付け、50 Torrの減圧雰囲気下でBatch式熱処理を行うことによりYBCO膜の結晶化熱処理(本焼)を行った。本焼後のYBCO膜の膜厚は約 $1.5\ \mu\text{m}$ であり、その上にAgの安定化層を形成した。

作製したYBCO線材の評価は、X線回折（XRD）により面内配向性を、表面形態の観察は走査型電子顕微鏡（SEM）を各々用いて行った。臨界電流値（ I_c ）は直流4端子法を用いて77K、自己磁界中で評価を行い、 $1\ \mu\text{V/cm}$ の電圧基準で、 I_c 値を定義した。

3. 結果及び考察

長尺線材の焼成を行うために、短尺試料による焼成条件の適正化を行った。Fig1に、本焼時の最高到達温度と I_c 値の関係を示す。今回検討した720-740°Cの範囲では I_c 値は大きく変動せず、730-740°Cにおいて 200A/cm-width を超える I_c 値が得られることを確認した。

焼成条件を適正化し、長尺線材の模擬焼成試験を行った。焼成条件の適正化の検討には、10mごとに短尺試料を模擬の仮焼膜付きダミー線に接続したパッチ線材を使用して行った。BaF₂が残留せず、完全にYBCO膜の結晶化反応が

終了する目安としてBaF₂に着目した。BaF₂のXRDピークが消失するために必要な保持時間は5時間とした。Fig2にパッチ線材の焼成による各位置の I_c 値の分布を示す。Fig2から、各位置で I_c 値が 150A/cm-width 以上の特性が均一に得られたのが確認できた。均一な I_c 分布が得られたことから、同焼成条件で総長50mのYBCO線材の焼成を行った。両端から5cm切出した試料の I_c 値は各々、 158A/cm-width と 150A/cm-width であった。全長試験の結果に関する詳細は、当日報告する。

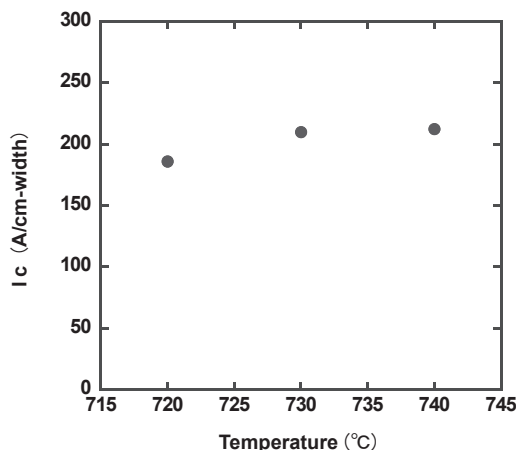


Fig1. Critical current density vs. Temperature for YBCO films on Ni-3at%W substrates.

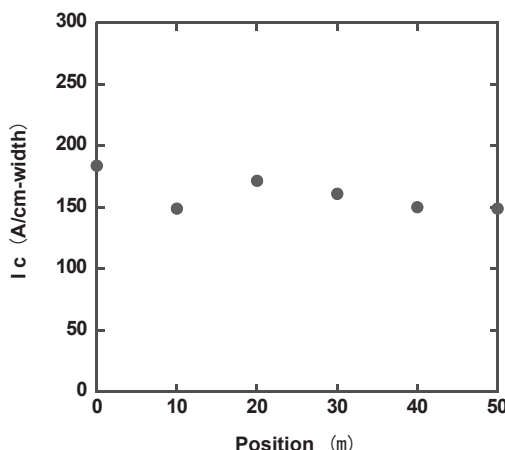


Fig2. Distributions of critical current density on 50m patch work YBCO tapes.

謝辞

本研究は、「超電導応用基盤技術研究開発」の一環として(財)国際超電導産業技術研究センター（ISTEC）を通じて新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託を受けて実施したものである。

改良型 TFA-MOD 法による Y 系線材の塗布仮焼膜の高速製造

High speed production of YBCO precursor film by advanced TFA-MOD process

市川 裕士, 中岡 晃一, 中西 達尚, 三浦 正志, 須藤 泰範, 中井 昭暢, 吉積 正晃,

山田 穰, 和泉 輝郎, 塩原 融(超電導工学研究所), 後藤 智誉, 矢島 明政((株)ADEKA)

Hiroshi ICHIKAWA, Kouichi NAKAOKA, Tatsuhisa NAKANISHI, Masashi MIURA, Yasunori SUTO, Akinobu NAKAI

Masateru YOSHIZUMI, Yutaka YAMADA, Teruo IZUMI, Yuh SHIOHARA(Superconductivity Research Laboratory,ISTEC)

Tbmokaka GOTO, Akimasa YAJIMA (ADEKA CORPORATION)

E-mail: ichikawa.hiro@istec.or.jp

1. はじめに

Y 系超電導線材は自己磁場および磁場中における高い臨界電流密度を有するため、ケーブル、変圧器、コイルへの応用が期待されている。これまで Y 系線材の作製方法の1つである Trifluoroacetates-Metal Organic Deposition (TFA-MOD) 法を用いた 56m 長において $I_c=250A/cm\text{-w}$ の線材作製に成功した。しかし機器応用へは低コストが必要であり、塗布・仮焼および本焼の高速化と高 I_c が必要となる。

本研究では、Reel-To-Reel(RTR) 仮焼炉を用いて TFA-MOD YBCO 長尺線材の塗布・仮焼の高速化を目的として、1 回の塗布膜厚および基板移動速度を変えた仮焼膜を作製し、その効果を検証した。

2. 実験方法

RTR 仮焼炉において、原料溶液をディップコート法により基板 ($CeO_2/IBAD-Gd_2Zr_2O_7$) に塗布・仮焼し、仮焼膜を作製した。基板移動速度を $2, 10m\cdot h^{-1}$ とし、1 回の塗布膜厚は基板移動速度と原料溶液の粘性調整により制御した。作製した仮焼・本焼膜は表面構造を光学顕微鏡および走査電子顕微鏡 (SEM)、断面構造を透過型電子顕微鏡 (TEM) で評価した。また組成分析は誘導結合プラズマ発光分析装置 (ICP) を用いた。 I_c, J_c 特性は四端子法により評価した。なお臨界電流値は電圧基準 $1\mu V\cdot cm^{-1}$ で定義した。

3. 結果及び考察

溶液粘性および基板移動速度を変化させたときの 1 回の平均塗布膜厚および J_c の結果を Table.1 に示す。1 回の塗布膜厚が厚く基板移動速度が速い場合 J_c は低下していることが分かる。なお Table.1 における膜厚は本焼後の膜厚換算である。 J_c が低い $10m\cdot h^{-1}$ で作製した仮焼膜の断面を TEM により観察した結果を Fig.1 に示す。この仮焼膜の上層は下層に比べて厚いことから、十分な焼成時間を経っていないと考えられる。また白い領域は組成分析より炭素を多く含んでいることが確認されていることから、炭素が未脱な領域と考えられる。このような仮焼膜を本焼し光学顕微鏡を用いて表面観察を行った結果を Fig.2 に示す。本焼膜表面には穴とクラックが確認された。これらの穴の近傍の SEM 観察結果を Fig.3 に示す。これらの穴が発生した原因のひとつとして、仮焼膜中に残存する炭素が、本焼時に雰囲気中の酸素と化学反応することで脱気し、穴およびクラックが発生したものと考えられる。

上記の結果から RTR 仮焼炉における高速塗布・仮焼膜を作製するためには、焼成時間と 1 回の塗布膜厚を調整する必要があると考え、基板移動速度 $10m\cdot h^{-1}$ とし、溶液粘性を調整することで 1 回の塗布膜厚を $0.25\mu m$ 以下に抑えた仮焼膜を作製し、 $J_c=1.5AM\cdot cm^{-2}$

(短尺)を得た。

今後は高速塗布・仮焼線材作製における焼成時間、1 回の塗布膜厚およびその他の条件を組み合わせることで現有炉における条件の最適化を行い、長尺作製を行う。

Table.1 J_c values and film thickness per coating in different traveling rates for coating / calcinations

	Viscosity of Solution (cp)	Traveling Rate for Coating/ Calcinations ($m\cdot h^{-1}$)	J_c ($MA\cdot cm^{-2}$) @77k	Thickness per Coating (μm)	Total Film Thickness (μm)
Standard	33	2.0	1.7	0.18	1.8
High-speed	15	10.0	1.0	0.30	1.8

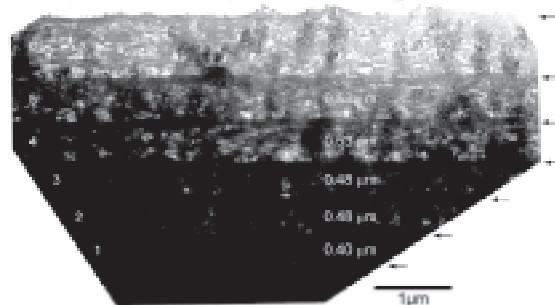


Fig.1 Cross sectional TEM image of a YBCO precursor film prepared by high-speed condition

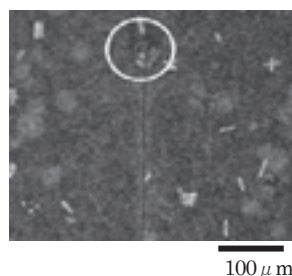


Fig.2 Plan-view image of a crystallized YBCO film with cracks prepared by high-speed condition for calcinations

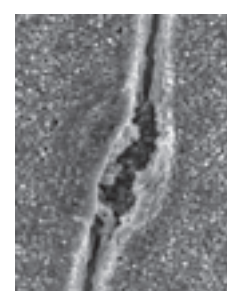


Fig.3 SEM image of crack marked by the circle in Fig.2

謝辞

本研究は、超電導応用基盤技術研究開発業務の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託により実施したものである。

RTR システム TFA-MOD YBa_{1.5}Cu₃O_y 線材の高速化技術

Increase of growth rate for RTR system TFA-MOD YBa_{1.5}Cu₃O_y coated conductors

三浦正志, 市川裕士, 須藤泰範, 中岡晃一, 吉積正晃, 山田穰, 和泉輝郎, 塩原融 (超電導工学研究所)

Masashi MIURA, Hiroshi ICHIKAWA, Yasunori SUTOH, Koichi NAKAOKA, Masateru YOSHIKAWA, Yutaka YAMADA, Teruo IZUMI, Yuh SHIOHARA(SRL)

E-mail: m_miura@istec.or.jp

1. はじめに

近年、REBa₂Cu₃O_y(REBCO)線材の実用化・事業化に向けた研究開発が世界中で着実に行われている。REBCO 線材の作製方法の一つに Trifluoroacetates-Metal Organic Deposition (TFA-MOD)法がある。この TFA-MOD 法を用いて、昭和電線ケーブルシステム(株)ではバッチ式焼成炉を用いて 200 m 長、200A の I_c を示す TFA-MOD YBa_{1.5}Cu₃O_y(YBCO)線材作製に成功し、低コストの線材作製手法の一つとして期待されている[1]。バッチ式焼成炉は、高速製造に適しているが作製可能線材長さは装置サイズで制限される。応用によっては、長尺単長が重要になることから、作製線材長に比較的制限のない RTR システム焼成炉の開発が必要となる。しかし、RTR(Reel-to-Reel)システム焼成炉は、焼成領域がバッチ炉に比べて小さく、高速化が課題である。

そこで本研究では、RTR システム焼成炉を用いて TFA-MOD YBCO 線材の本焼成時における高速成長を実現するために、導入・排気ガス流速、全圧、水蒸気分圧を制御し TFA-MOD YBCO 線材を作製し、高速性と性能の関係を検討した。

2. 実験方法

TFA-YBa_{1.5}Cu₃O_y 溶液を CeO₂($\Delta\phi=4.6$ deg.) / IBAD-Gd₂Zr₂O₇ ($\Delta\phi=14$ deg.)/Hastelloy C276基板上にマルチターンRTR仮焼炉を用いて、塗布・仮焼し、仮焼膜を作製した。作製した仮焼膜をRTRシステム大型高速炉により本焼成した。本焼の膜厚は1 μ mである。本焼条件として、ガス流速 (u): $1.5 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-2}$ m/s、全圧(P_1): 180~300 Torr、水蒸気分圧(P_{H_2O}):18~36 Torrと変化させた。

作製した TFA-MOD YBCO 線材は、結晶構造評価を X線回折(XRD)法、組成を誘導結合プラズマ発光分析法(ICP)を用いて評価した。 T_c 、 J_c は四端子法を用いて、電気抵抗率の温度依存性および電流-電圧特性(閾値 1 μ V/cm)から算出した。

3. 結果及び考察

TFA-MOD YBCO 薄膜の本焼時における成長速度(R)には u 、 P_{H_2O} が影響することが報告されている[2]。そこで今回の実験においてそれぞれのパラメータを変化させ、成長速度 R とこれらのパラメータの関係を調べた結果、高 u 、高 P_{H_2O} ほど YBCO の成長速度が速いことが確認された。

成長速度と臨界電流 (I_c)との関係を Fig.1 に示す。成長速度が 1×10^{-10} m/s より遅い場合には、成長速度が遅いほど I_c が低いことが分かる。この理由を調べるために、成長速度の遅い線材の微細構造観察を行った結果、500nm 以上の Y₂Cu₂O₅ や CuO などの非超電導相が本焼時に粗大化成長していることが確認された。成長速度の遅い場合には、非超電導相が粗大化すると考えられ、これらが電流を遮断し I_c を低下させていると考えられる。

以上の結果をもとに、成長速度を制御することにより 5m 長、製造速度 3.3 m/h(現有炉の 1/3 使用(2-turn))において End-to-End (ETE)の $I_c(I_{c,ETE})=250$ A/cm-width の線材作製に成功した(Fig.2 参照)。この製造速度は、現有炉の全面積(6-turn)を使用し、現在行っている装置改造に伴って可能となる流量 150 L/min に増やした場合には、15 m/h 相当であり、線材コスト 3 円/Amが見込める速度である。

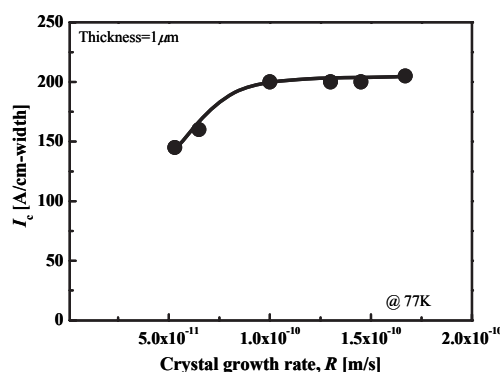


Fig.1 I_c of TFA-MOD YBCO CCs as a function of R .

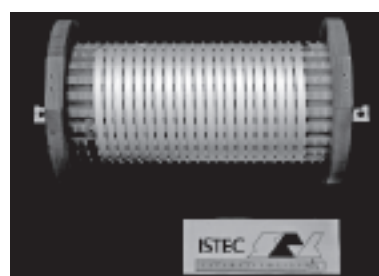


Fig.2 Photograph of a 5m-long RTR system TFA-MOD YBCO CCs.

4. 謝辞

本研究の一部は超電導応用基盤技術開発の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から委託を受けて実施したものである。また、本研究の一部は、(独)日本学術振興会の特別研究員奨励費(20・4011)の助成を得たものである。

【参考文献】

- [1] 小泉他 2007 年度秋季低温工学・超電導工学会 概要集、p207
- [2] R. Teranishi et al., Physica C **412-414** (2004) 920.

フッ素フリーMOD法を用いた薄膜超電導線材の開発 Development of ReBCO coated conductors by fluorine-free MOD method

本田 元気, 種子田 賢宏, 小西 昌也, 永石 竜起, 太田 肇, 新海 優樹, 加藤 武志(住友電工)
HONDA Genki, TANEDA Takahiro, KONISHI Masaya, NAGAISHI Tatsuoki, OTA Hajime, SHINGAI Yuki, KATO Takeshi(SEI)
E-mail: honda-genki@sei.co.jp

1. はじめに

超電導ケーブルや超電導マグネット等の電力機器への適用を目指して、ReBCO (Re:Y、希土類元素)系の薄膜超電導線材の開発が精力的に行われている。薄膜作製プロセスの一つであるMOD法は、高価なレーザー装置や真空装置を必要としないため、低コストプロセスとして注目されている。中でも、フッ素フリーMOD法は環境負荷が低いといった特徴を持っている。本研究では産総研が開発したフッ素フリーのMOD溶液を用いて薄膜超電導線材を開発した結果について報告する。

2. 実験方法

基板として配向金属基板を用い、その上に CeO_2 / YSZ / CeO_2 三層構造中間層を気相法によりエピタキシャル成長させた。線材試作のため、得られた基板を1cm角に切断し、その上に Re (Y または Ho)、Ba、Cu を含む金属アセチルアセトナート系溶液を塗布し、大気中の仮焼成による熱分解を経て Ar-O_2 混合ガス雰囲気および酸素雰囲気中で熱処理することで ReBCO 膜を形成した。原理検証として、1cm角の CeO_2 / YSZ 単結晶基板上にも同様な手法で ReBCO 膜を作製した。作製した線材は X 線回折や SEM 表面観察により結晶性を、誘導 J_c 法により $T=77\text{K}$ 、自己磁場下における超電導特性を評価した。

3. 実験結果と考察

図1に膜厚と J_c の関係を示す。成膜条件の最適化を行うことで、単結晶基板上、配向金属基板上のいずれも J_c が改善し、単結晶基板上で $J_c \sim 6\text{MA}/\text{cm}^2$ 、配向金属基板上で $J_c \sim 2\text{MA}/\text{cm}^2$ という高特性を得ることができた。特に、単結晶基板上では膜厚 $0.3\mu\text{m}$ で $J_c=200\text{A}/\text{cm}$ を超える特性を示すものも得られた。XRD ピーク強度も膜厚と共に強くなっており(図2)、高度に c 軸配向した膜ができていることが分かる。今後は、配向金属基板上で成膜条件の最適化をさらに進め、単結晶基板上の特性に近づけていく予定である。その他の結果については当日報告する。

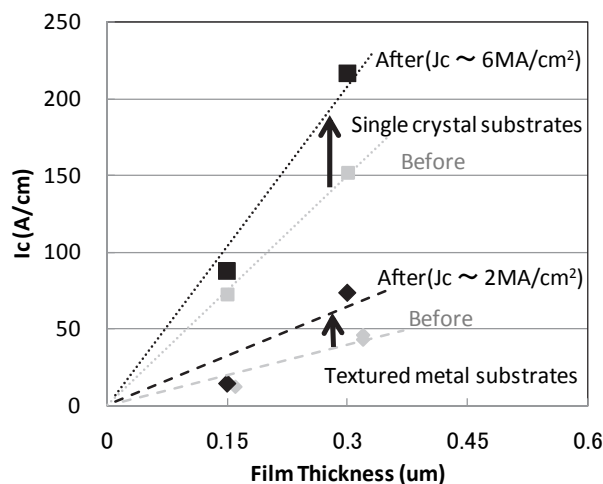


Fig. 1 Thickness dependence of critical current (J_c).

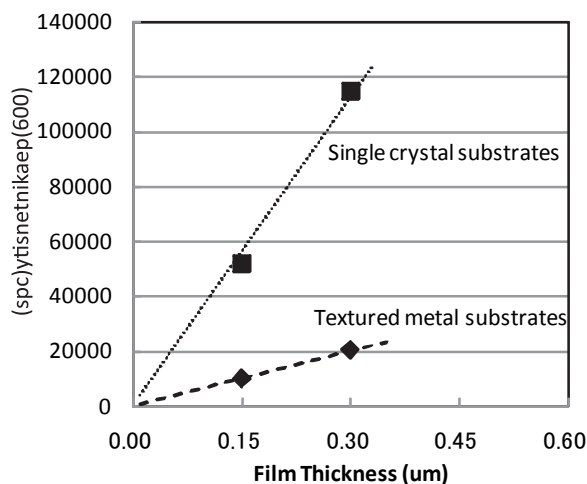


Fig. 2 XRD (006) peak intensity of ReBCO on textured metal substrate.

4. 謝辞

本研究の一部は超電導応用基盤技術研究体の研究として、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託を受けて実施したものである。フッ素フリーのMOD溶液を提供頂いた産業技術総合研究所の熊谷俊弥博士、山口巖博士、相馬貢博士に感謝致します。

IBAD-MgO 基板をベースにした REBCO 線材開発 IBAD-MgO-Based Coated Conductor Development

宮田 成紀, 福島 弘之, 栗木 礼二, 衣斐 顕, 吉積 正晃, 木下 晶雄, 山田 穰, 塩原 融(超電導工学研究所),
加藤 丈晴, 平山 司(ファインセラミックスセンター)

MIYATA Seiki, FUKUSHIMA Hiroyuki, KURIKI Reiji, IBI Akira, YOSHIZUMI Masateru, KINOSHITA Akio, YAMADA Yutaka, SHIOHARA Yuh (SRL-ISTEC); KATO Takeharu, HIRAYAMA Tsukasa (JFCC)

E-mail: miyata@istec.or.jp

我々のグループでは、イオンビームアシスト蒸着 (IBAD) 法で作製した配向基板をベースに $REBa_2Cu_3O_{7-d}$ (REBCO) 線材の開発を行っている。製造速度の観点から IBAD には MgO を採用し、その他種々の中間層も含めた基板プロセスの確立と産業化を目指した条件の最適化を進めている。

超電導層の成膜にはパルスレーザー蒸着 (PLD) 法を用い、IBAD-MgO ベースの基板上で 1.1m 長サンプルにおける 196A の End-to-end I_c (全長通電時の臨界電流値) の達成を前回報告した。この 1m 級サンプルに採用された中間層構造は $CeO_2 / LaMnO_3 / IBAD-MgO / Y_2O_3 / Al_2O_3$ の 5 層構造であった。このうち Y_2O_3 層は直上に成膜される IBAD-MgO 層の配向を促す役割を担っており、シード層と呼ばれる。我々のグループではこのシード層として $Gd_2Zr_2O_7$ (GZO) を採用し、 Y_2O_3 と同等の配向度が得られるだけでなく、条件ウィンドウを拡大することができるを見出した。これはプロセスの安定化に繋がり、工業化を目指したプロセス開発においては非常に重要なファクターである。さらに厚膜化によってバリア層としての役割を兼ねることが可能であり、(将来的なさらなる高速化を考えるとあくまで暫定的な値であるが) 大型装置の適用によって 20m/h の製造速度が達成できることも現時点では大きなメリットである。このバリア層を兼ねた GZO シード層を採用し、構造の簡素化に成功した $CeO_2 / LaMnO_3 / IBAD-MgO / Gd_2Zr_2O_7$ の 4 層構造の基板を用いた 10.6m 長試料において、275A の End-to-end I_c を達成することができた。それぞれの製造速度は Table I に示す通りである。これを見るとこの時点におけるボトルネックが IBAD および CeO_2 プロセスにあることがわかる。IBAD 層については現在マルチターン方式を採用した大型装置の適用を進めており、一定の成果が得られている。詳細については衣斐ら[1]、吉積ら[2]、および福島ら[3]の本会議における発表を参照いただきたい。 CeO_2 プロセスについては、いくつかのアプローチを考えているなかで、まずマルチターン方式の採用による高速化を試みた。装置改造後、3レーンの使用により 10m/h で $\Delta\phi=3.7^\circ$ 、20m/h で $\Delta\phi=4.9^\circ$ の配向度が得られることが確認された。またこの実験においては、上述のように IBAD プロセスに対して大型装置が適用された基板が用いられており、 $\Delta\phi=4.9^\circ$ の試料においては IBAD プロセスも含めた全ての中間層プロセスに関して 20m/h 以上の製造速度が達成されている (Table I)。

また、製造速度以外にも多くの開発要素が挙げられる。それらを列挙すると以下のようなことになる。MgO を用いた IBAD プロセス開発を行う場合があれば参考にしていただきたい。

金属基板・・・表面平滑性が重要であり、前回は報告したように同じ成膜条件でも R_a 値の異なる基板上に成膜を行うと $R_a=4.6nm$ では $\Delta\phi=8^\circ$ であったが $R_a=2.1nm$ では $\Delta\phi=4^\circ$ の高配向膜が得られた。

バリア層 (Al_2O_3 or GZO)・・・超電導層を保護する上向きの拡散だけでなく、金属基板 (ハステロイ基板) を保護する役割も重要である。 Al_2O_3 は Cr を、GZO は Ni を選択的に拡散させる傾向にあり、上方への拡散量 (超電導層の保護) としては一概にどちらが有利とは言えないが、金属基板の保護という意味では Cr_2O_3 の膜は有利と言えるかもしれない。しかしながら現時点においては Al_2O_3 層は高い製造速度が得られておら

ず、その点では GZO が有利となる。(この点に関しては金属 Al ターゲットを用いたリアクティブ成膜なども検討している。)

シード層 (Y_2O_3 or GZO)・・・IBAD-MgO 層の配向性は下地の状態に非常に影響を受けやすい。IBAD-GZO プロセスと異なりシード層無しでは配向構造は得られず、得られないだけでなく膜形成がされずに剥離してしまう場合もある。また配向特性はシード層の表面状態に非常に敏感で、Fig.1 に示すような成長モードの違いにより、最終的に得られる配向度は著しく異なる。

IBAD 層・・・前回までの報告を参照[4]。

第 1 エピ層 ($LaMnO_3$)・・・以下に示す理由から超電導層直下のテンプレート (キャップ層) として CeO_2 を採用しているが、IBAD-MgO 層直上に CeO_2 を安定的にエピ成長させることがいまのところできていない。そのためエピ成膜が可能で、成膜レートが大きい LMO を第 1 エピ層として採用している。

第 2 エピ層 (キャップ層; CeO_2)・・・界面反応に対する安定性、格子整合性などから CeO_2 を採用している。また IBAD-GZO を用いたプロセス同様 IBAD-MgO 上においても配向度が著しく向上する傾向を確認している。

超電導特性に関しては、IBAD-GZO プロセスと同等のものが再現性良く得られている。

本研究は、超電導応用基盤技術研究開発業務の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託により実施したものである。

Table I: Production rates of selected samples.

	196A x 1.1m	275A x 10.6m	($\Delta\phi=4.9^\circ$)
CeO_2	4.8 m/h	4.8 m/h	20 m/h
$LaMnO_3$	20 m/h	20 m/h	30 m/h
IBAD-MgO	1.8 m/h	3.0 m/h	24 m/h
Y_2O_3 or GZO	16 m/h (Y)	20 m/h (G)	20 m/h (G)
Al_2O_3	3.8 m/h	-	-

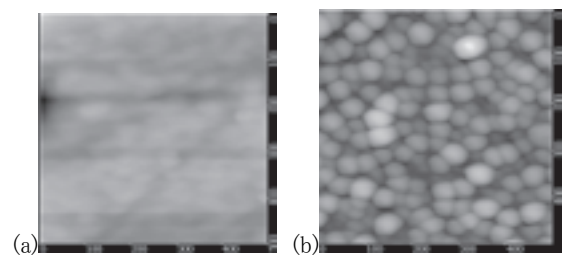


Fig. 1 AFM images (500nm x 500nm) of Y_2O_3 surfaces with (a) 2D- or (b) 3D-like growth mode. These samples were deposited by magnetron sputtering under the pressures of (a) 30 and (b) 1 mTorr.

参考文献

- [1] A. Ibi, et al.: No. 2A-a08 in this conference.
- [2] M. Yoshizumi, et al.: No. 2A-a06 in this conference.
- [3] H. Fukushima, et al.: No. 2A-a07 in this conference.
- [4] S. Miyata, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.200; Vol. 76 (2007) p.21.

Y系線材用高速IBADプロセスの開発

Development of high speed IBAD process for long coated conductors

吉積 正晃, 福島 弘之, 宮田 成紀, 衣斐 顕, 山田 穰, 和泉 輝郎, 塩原 融 (SRL)

YOSHIZUMI Masateru, FUKUSHIMA Hiroyuki, MIYATA Seiki, IBI Akira, YAMADA Yutaka, IZUMI Toru, SHIOHARA Yuh (SRL)

E-mail: myoshizumi@istec.or.jp

1. 緒言

Y系高温超電導線材はその材料自体の高い特性、線材構造に起因する低交流損失化や低コスト化への可能性から世界中で研究開発が盛んで、近年の研究開発の進展により、電力機器応用を中心に実用化への期待が高まっている。

Y系高温超電導線材には高特性発揮のため、多くの場合にIBAD (Ion Beam Assisted Deposition)法を用いて作製された中間層を利用しているが、この手法は非常に低速であり、コスト、必要線材量供給の両面から、大幅な改善の必要があった。最近、MgOに代表される岩塩構造を用いたIBAD法によって、非常に高い製造速度が実現可能である事が分かり[1]、わが国でも開発の必要性が高まっていた。

本研究では、Y系線材に利用可能なMgOを用いた高速成膜中間層を開発、24m/hのIBAD層製造速度で500A級のIcを有する数十m長のY系超電導線材作製に成功したので、報告する。

2. 実験方法

機械研磨されたHastelloy C276金属テープにGZOベッド層を成膜した基板を使用、MgOをIBAD法により成膜した。MgO層は5nm以下と非常に薄く、その、特に最上層のみの結晶性を測定する事は出来ないため、評価のためにRF-sputteringによりLaMnO₃(LMO)層をMgO上にエピタキシャル成膜し、X線回折によりLMO層の面内配向度 $\Delta\phi$ を評価した。

最終的に得られた最適条件を用い、マルチターン法により数十m級長尺基板を作製し、LMO上に自己配向効果のあるCeO₂をPLD法により成膜して長尺基板特性を評価した。更に、PLD法によりGdBCO超電導層を成膜し[2]、GdBCO(2.5 μ m)/CeO₂(450nm)/LMO(18nm)/IBAD-MgO(2.5nm)/GZO(110nm)/Hastelloy構造の長尺線材を作製、超電導特性の分布を測定した。

3. 結果

試料をチャンバーにセットしてからMgO成膜までの事前排気時間を5時間、15時間と変化させた場合のLMO結晶面内配向 $\Delta\phi$ とMgO成膜時間との関係を図1に示す。何れも成膜前到達圧力は 1×10^{-4} Pa程度であったが、長時間真空保持したものは結晶の配向が見られたのに対し、短時間排気の試料では結晶の配向は見られず、面内配向の測定が出来ない程であった。ここで、封止圧力の時間変化から吸着ガスの放出量を見積もると、長時間排気により、チャンバー内部への吸着ガスの放出が2割程度に抑えられている事が分かった。吸着ガス成分は殆どが水蒸気である事が良く知られており、本装置チャンバーにおいても残留ガス主成分は水蒸気であると考えられる。成膜時チャンバー内部に水蒸気が存在するとMgOが水蒸気と反応して水酸化物を形成する事により結晶構造が変化し、アシストイオンビームによる結晶配向作用が働かなくなる事がこの差異の原因と考えられる。

そこで、長時間排気条件下で更に、条件検討を進めてLMOの段階で15度以下の面内配向が得られるようになったため、50m長の長尺基板作製実験を行った。ここではマルチターン法を用いてMgO層の製造速度を24m/hとして基板作

製を行った。CeO₂(450nm)/LMO(18nm)/IBAD-MgO(2.5nm)/GZO(110nm)/Hastelloy構造でCeO₂表面の結晶配向性を評価し、50m長基板の両端で共に面内配向4度以下の良好な結晶配向を実現した。

この基板を用いてPLD法によりGdBCO超電導層を成膜した線材のIc特性分布を図2に示す。ほぼ全ての地点で500A/cm-w、即ち臨界電流密度2MA/cm²以上の高い特性を発揮しており、基板の高い結晶性が全長にわたって維持されている事を示している。

本研究により、高い特性を発揮できるIBAD法を用いた基板作製が高速で可能となり、超電導電力機器開発へ向けた線材供給とコスト削減の見通しを得た。

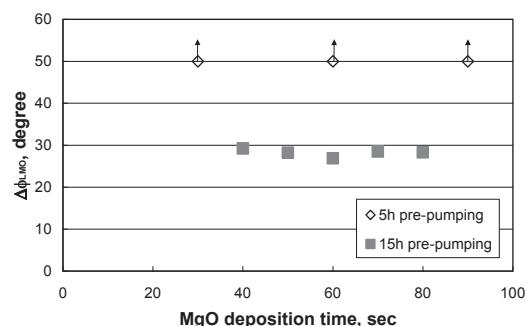


Fig.1 IBAD-MgO deposition time dependence of $\Delta\phi$ of LMO on IBAD-MgO deposited under the same deposition condition with different pre-pumping time.

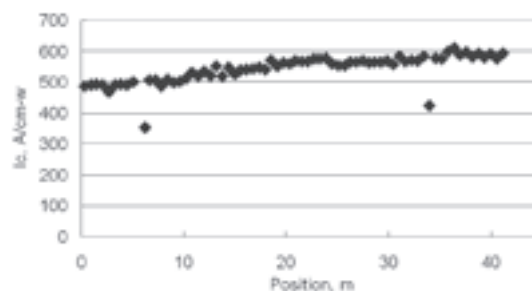


Fig. 2 Longitudinal I_c distribution of the 41 m long GdBCO coated conductor (using an IBAD-MgO substrate) at 77 K and 0 T for every 0.6 m.

4. 謝辞

本研究は、超電導応用基盤技術研究体の研究として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託を受けて実施したものである。

参考文献

1. P. N. Arendt, S. R. Foltyn: MRS Bulletin, vol. 29 (2004) p. 543
2. A. Ibi, S. Miyata, R. Kuriki, H. Fukushima, M. Yoshizumi, A. Kinoshita, Y. Yamada, Y. Shiohara: Abstracts of CSJ Conference, 2008 spring, 2A-a08.

DC リアクティブスパッタによる高速 IBAD-MgO 基板の開発 Fabrications of IBAD-MgO substrate by reactive DC sputter deposition.

福島 弘之, 宮田 成紀, 衣斐 颯, 栗木 礼二, 木下 晶雄, 山田 穰 (SRL 名古屋); 吉積 正晃, 塩原 融 (SRL 東京)
FUKUSHIMA Hiroyuki, MIYATA Seiki, IBI Akira, KURIKI Reiji, KINOSHITA Akio, YAMADA Yutaka (SRL-Nagoya);
 YOSHIZUMI Masateru, SHIOHARA Yuh (SRL-Tokyo);
 E-mail: h-fukushima@istec.or.jp

1. はじめに

大面積化が可能、かつ、安価な DC リアクティブスパッタを用いて IBAD (Ion-Beam Assisted Deposition) -MgO 基板の開発を行った。150 m/h の高速で IBAD-MgO 層を成膜した。また、本 IBAD-MgO 上でも PLD-CeO₂ 層が自己配向すること、そのために RF(Radio Frequency)スパッタ LaMnO₃(LMO) 層が必要であることも明らかにした。

2. 実験

Gd₂Zr₂O₇(GZO)シード膜付ハステロイ基板で IBAD-MgO 基板の開発を行っている[1]。金属 Mg ターゲットを用いて、DC リアクティブスパッタ法で IBAD-MgO 層を成膜した (Fig.1)。その上に RF スパッタ法で LMO 層、最後に PLD 法で CeO₂ 層を成膜した。長尺化予備試験として、20 cm 長の IBAD-MgO 用基板を約 10 m おきに並べて 150 m/h 走行の 50 m パッチ試験を実施した。線材 I_c 定義は 1 μV/cm。

3. 結果

1) 自己配向 CeO₂ 現象と LMO の役割

IBAD-MgO 成膜基板上でも PLD-CeO₂ 層の自己配向現象が起こることを見出した。但し、LMO 層が必要であり、また、CeO₂ の自己配向には LMO 膜厚依存性があることが明らかになった。LMO 膜厚に対する LMO(220)の $\Delta\phi$ 及びその上の PLD-CeO₂ 層(約 470 nm, LMO(200)||CeO₂(110))の CeO₂(220)の $\Delta\phi$ を Fig.2 に示す。LMO の $\Delta\phi$ は膜厚増加に伴い向上し 20° 程度で飽和した。ところが、その上に PLD-CeO₂ 層(45° ローテーションした方位関係にある)を載せると、CeO₂ は自己配向を示した。図中矢印の箇所で最小 $\Delta\phi \sim 9.9^\circ$ を得た (Fig.2)。LMO 層なしの場合には CeO₂ は cube-on-cube 成長し、その $\Delta\phi$ は約 21° と自己配向の度合いは低かった。LMO 層膜厚が薄くなるに連れて LMO 格子定数は 3.953 Å から 3.948 Å に向かって減少する。PLD-CeO₂ の格子定数は 5.431 Å、(110)面間距離は 3.840 Å であり、薄膜 LMO 層の方が LMO/CeO₂ 接合部における格子ミスフィットが小さくなる。こうしたことも PLD-CeO₂ 層の自己配向を進める一因と思われる。現在までに、成膜温度の最適化を行い、LMO 層を線速 30 m/h で成膜可能な条件を見出した (膜厚 19 nm)。PLD-CeO₂ 層の線速は 4.8 m/h である。

2) DC リアクティブスパッタによる IBAD-MgO 層の作製

上記構造で IBAD-MgO 層の成膜条件を探索した。酸素分圧及び全圧を下げることで、CeO₂ 表面での $\Delta\phi$ が改善する傾向を掴み、線速 150 m/h の高速で IBAD-MgO 層を成膜できる条件を見出した。CeO₂ 表面で $\Delta\phi = 7.2^\circ$ の基板を得ることができ、その上に 3.5 μm 厚のピン入り GdBCO 成膜を行って、I_c = 351 A/cm (J_c = 1.0 MA/cm²) を得た。また、50 m パッチ試験の結果、各サンプルの CeO₂ 表面での $\Delta\phi$ は約 10° であった (Fig. 3)。2.0 μm 厚の GdBCO 成膜を行い、10 cm I_c = 220-286 A/cm を得た[2]。

4. 謝辞

本研究は、超電導応用基盤技術研究体の研究として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託を受けて実施したものである。

[1] S. Miyata, et al.: presented at CSJ Conference 2008 Tokyo, Japan, Program No. 2A-a05

[2] A. Ibi, et al.: presented at CSJ Conference 2008 Tokyo, Japan, Program No. 2A-a08

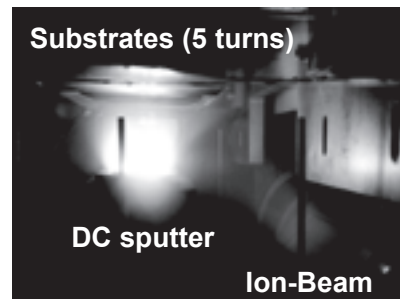


Fig. 1 Photo of IBAD-MgO system using DC sputtering.

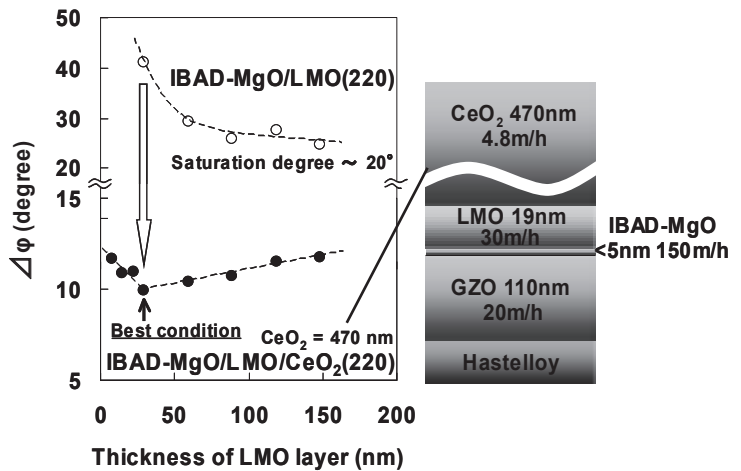


Fig. 2 LMO layer thickness dependences of in-plane grain alignment ($\Delta\phi$) of LMO layers and PLD-CeO₂ layers, and the structure and tape speed of IBAD-MgO substrate.

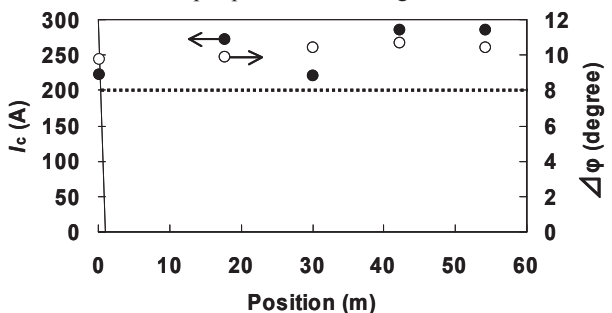


Fig. 3 I_c distribution of GdBCO coated conductor with 2.0 μm thickness and $\Delta\phi$ distribution of PLD-CeO₂ layers for each 10 cm long samples on 50 m substrate.

IBAD-MgO 基板及び CeO₂/GZO 基板上での高 I_c GdBCO 層の作製

Fabrication of GdBCO layers with high I_c by using PLD method on IBAD-MgO and CeO₂/GZO substrates

衣斐 顕, 宮田 成紀, 栗木 礼二, 福島 弘之, 吉積 正晃, 木下 晶雄, 山田 穰, 塩原 融(超電導工学研究所)
 IBI Akira, MIYATA Seiki, KURIKI Reiji, FUKUSHIMA Hiroyuki,
 YOSHIKUMI Masateru, KINOSHITA Akio, YA MADA Yutaka, SHIOHARA Yuh (SRL-ISTEC)
 E-mail: ibi@istec.or.jp

1. はじめに

GdBa₂Cu₃O_{7-δ} (GdBCO)線材は, YBa₂Cu₃O_{7-δ} (YBCO)線材に比べて臨界温度(T_c)が高い, 磁場中での臨界電流(I_c)が高い等の特性を持ち, 実用化が期待されている線材である。

PLD 法において, 高 I_c 特性をもつ GdBCO 層の成膜方法としては, 低 Ba 組成の成膜用ターゲットを用いることで粒界結合を改善する方法が有効であり[1], また, TFA-MOD 法でも, 高 I_c YBCO 膜の作製において, 低 Ba 濃度溶液を用いることで粒界特性を向上させる方法が用いられている[2]. 今回我々は, 低 Ba 組成比のターゲットを用いた PLD 法で GdBCO 層の成膜を行った. 成膜は, CeO₂/IBAD-Gd₂Zr₂O₇(GZO)基板上に加えて, 低コスト化が期待されている IBAD-MgO 基板上でも行った.

2. 実験

使用した基板は, CeO₂/IBAD-GZO/Hastelloy 基板と CeO₂/LaMnO₃(LMO)/IBAD-MgO/GZO/Hastelloy 基板で, GdBCO 層の成膜には GdBa_{1.9}Cu₃O_x ターゲットを使用した. 成膜は Multi-plume and Multi-turn (MPMT)-PLD 法を用いた Reel-to-Reel 方式で行った. 厚膜化に際しては, 成膜回数増加(膜厚増加)に対して成膜設定温度を上昇させて行う多層成膜法を用いた.

3. 実験結果

図1は, GdBa₂Cu₃O_xターゲット及びGdBa_{1.9}Cu₃O_xターゲットを使用して作製したGdBCO層のI_cの膜厚依存性である. 使用した基板はどちらもCeO₂/IBAD-GZO/Hastelloy基板である. 図のように, 通常のGdBa₂Cu₃O_xターゲットを用いて成膜したGdBCO層は, I_cの観点から, 1μm以上の厚膜化が困難になってくるが, GdBa_{1.9}Cu₃O_xターゲットを用いて作製したGdBCO層のI_cは3μmまで増加しており, この低Ba組成のターゲットが高I_c厚膜化に対して有効であることがわかり, 更なる厚膜化・高I_c化も可能であると考えられる. 明確な要因は現在検討中であるが, 上記に示した通り, 粒界結合特性改善も大きな要因の一つであると考えられる.

図2は, CeO₂/IBAD-GZO/Hastelloy基板上に成膜した5.4 m長GdBCO線材の長手方向のI_c特性分布である. 使用したターゲットはGdBa_{1.9}Cu₃O_xで, 5.4 m長で約700 A, 0.6 m長で727 A, 0.1 m長で751 Aという高I_cが得られた. GdBCO層の膜厚は約3.0 μmである.

図3は, 41 m長IBAD-MgO基板[3][4][5]上にGdBCO層を成膜した線材の長手方向のI_c分布特性である. 使用したターゲットはGdBa_{1.9}Cu₃O_xで, 膜厚は約2.5 μmである. I_c測定は0.6 m間隔で行い, 最大のI_cは608.5 Aであった. また, 各I_c測定結果のn値から推測した41 m長のend-to-endのI_cは430.8 Aであった. このように, IBAD-MgO基板を用いた線材の高I_c化・長尺化も可能になってきている.

4. 謝辞

本研究は, 超電導応用基盤技術研究体の研究として, 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託を受けて実施したものである.

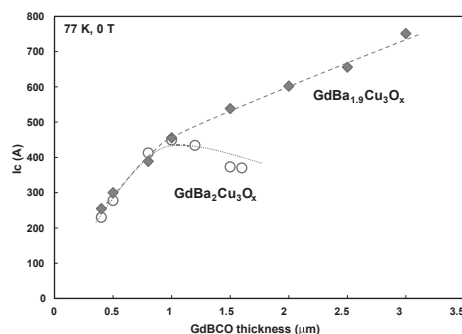


Fig. 1 Thickness dependence of I_c at 77 K and 0 T of GdBCO coated conductor deposited by using GdBa_{1.9}Cu₃O_x and GdBa₂Cu₃O_x targets.

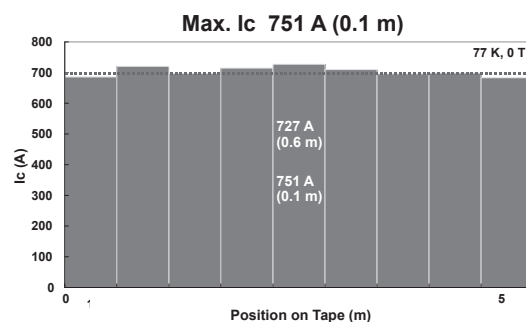


Fig. 2 Longitudinal I_c distribution of 5.4 m long GdBCO coated conductor (using GdBa_{1.9}Cu₃O_x target) at 77 K and 0 T for every 0.6 m.

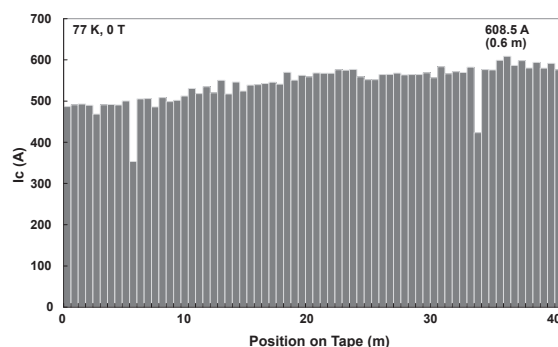


Fig. 3 Longitudinal I_c distribution of 41 m long GdBCO coated conductor (using IBAD-MgO substrate and GdBa_{1.9}Cu₃O_x target) at 77 K and 0 T for every 0.6 m.

参考文献

1. S. Lee, N. Chikumoto, et al.: presented at CCA 2007 Jeju, Korea, Program No. O-6
2. M. Yoshizumi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 75 (2006) p. 237
3. S. Miyata, et al.: presented at CSJ Conference 2008 Tokyo, Japan, Program No. 2A-a05
4. M. Yoshizumi, et al.: presented at CSJ Conference 2008 Tokyo, Japan, Program No. 2A-a06
5. H. Fukushima, et al.: presented at CSJ Conference 2008 Tokyo, Japan, Program No. 2A-a07

IBAD/PLD 法による高特性 GdBCO 長尺線材の開発

Development of long GdBCO coated conductors with high performance by IBAD/PLD technique

五十嵐 光則, 富士 広, 柿本 一臣, 羽生 智, 三浦 貴博, 花田 康, 林田 知朗, 飯島 康裕, 齊藤 隆(フジクラ)
 IGARASHI Mitsunori, FUJI Hiroshi, KAKIMOTO Kazuomi, HANYU Satoru, MIURA Takahiro, HANADA Yasushi,
 HAYASHIDA Tomoaki, IJIMA Yasuhiro, SAITOH Takashi (Fujikura Ltd.)
 E-mail : m_igarashi@fujikura.co.jp

1. はじめに

Y 系高温超電導体は磁場中でも高い臨界電流特性を示すことから、変圧器や限流器、モータなど多様な機器への応用が期待されており、それらに向けた線材開発が活発に進められている。フジクラではIBAD/PLD 法により一連の Y 系超電導体の中でも磁場中特性に優れた $Gd_1Ba_2Cu_3O_7$ (以下 GdBCO) において高特性の長尺線材を開発してきた。これまで 500 m 級長尺において平均 $I_c > 300$ A の非常に優れた線材作製に成功しているが、 I_c の局所低下部が発生するなどの課題があった。そこで今回は、金属テープ基板を研磨し基板表面を均一化することで IBAD 中間層の高品質高速化を試み、さらに磁場中での特性を改善するために超電導層に人工ピンを導入して 500 m 級の長尺線材を作製したので報告する。

2. 実験方法

短尺サンプルでの実験を繰り返し、条件を最適化した後に 500 m 級長尺成膜を行った。無配向 Ni 合金テープ基板 (幅 10 mm, 厚さ 0.1 mm) を研磨した後に、大型 IBAD 装置により $Gd_2Zr_2O_7$ (以下 GZO) を $1.0 \sim 1.5 \mu m$ 成膜した。IBAD-GZO 層上にはレーザービームスキャンによる大面積マルチターン PLD 装置により、キャップ層の CeO_2 と、その上に超電導層の GdBCO を成膜した。PLD ではターン数を従来の 2 ターンから 3 ターンに増やし成膜面積を広げることで高速化を試み、 CeO_2 は $5 \sim 10$ m/h で $1 \mu m$ 程度成膜し、超電導層は 6.7 m/h で $2.3 \mu m$ 程度成膜した。なお超電導層の構造は、純粋な GdBCO ターゲットを使用した層と ZrO_2 を混合した GdBCO ターゲットによる層の混合積層構造を採用した。作製した超電導テープは、超電導層上に Ag を $20 \mu m$ 程度スパッタ蒸着した後、大型電気炉によって酸素気流中でアニールをした。評価方法としては、相の同定は XRD の $\theta-2\theta$ 測定で行い、配向度の評価は XRD による正極点測定での $\Delta\phi$ で行った。臨界電流特性の評価は、閾値を $1 mV/cm$ として液体窒素中での通電で行い、長尺では連続評価装置にて 70 cm 間隔で連続測定を行った。

3. 結果および考察

研磨した基板を使用することで表面粗さが改善され、500 m 長の IBAD-GZO の $\Delta\phi$ は $11^\circ \sim 14^\circ$ と優れた配向を示した。基板研磨は IBAD 膜の高配向化に有効であると言える。その結果 IBAD 膜上の CeO_2 の配向も $\Delta\phi = 4^\circ$ 前後と高配向であった。超電導層については、人工ピンの導入を検討した。Fig. 1 には超電導層を 3 層積層した短尺サンプルの 3 T での I_c の磁場印加角度依存性を示すが、中央に ZrO_2 混入 GdBCO 層を導入すると、無磁場での I_c の低下を抑制しつつ磁場中での I_c が効果的に向上することがわかった。この知見を活かし、500 m 級成膜では 6 層成膜の中央 2 層を人工ピン導入層とした。作製した 500 m 線材全長の I_c 分布を Fig. 2 に示すが、平均 I_c は 440 A と非常に高い臨界電流特性を示した。Table 1 にはここ 1 年間の PLD による超電導層成膜の進展を示すが、製造速度や臨界電流特性を含め総合的に製造能力が向上していることがわかる。今後は、厚膜化に伴う I_c 低下の低減や長手方向の I_c 分布の均一性向上を課題とし、更なる高品質、高特性の線材開発を進める予定である。

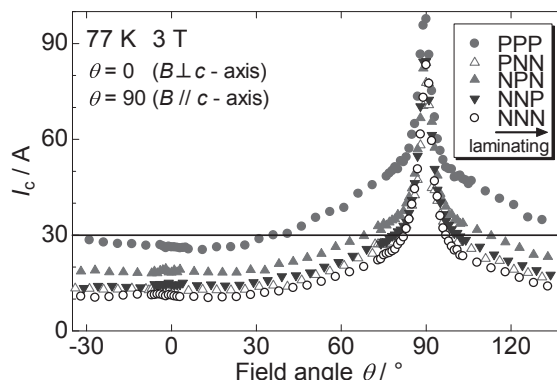


Fig. 1 Dependence of magnetic field angle for I_c of short samples with 3 GdBCO layers. N is the pure GdBCO layer and P is the GdBCO layer with ZrO_2 .

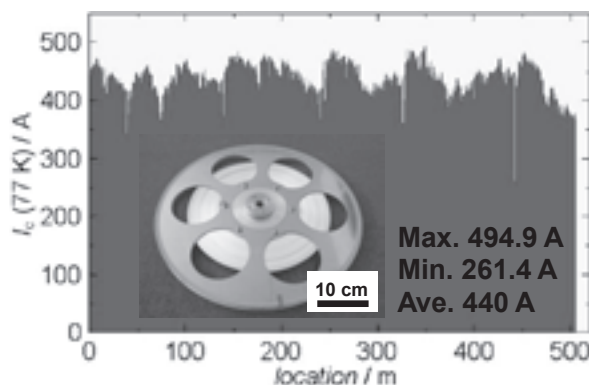


Fig. 2 I_c distribution of GdBCO coated conductor over 500 m. Inset is the photo of 500 m tape.

Table 1 The progress in laminating GdBCO layers by PLD technique last 1 year

	2007.1	2007.8	2008.2
turn	1	2	3
rate [m/h]	20	40	40
lamination	6 layers	6 layers	6 layers
throughput [m/h]	3.3	6.7	6.7
thickness [μm]	1.8	2.0	2.3
artificial pinning	none	none	middle 2 layers
I_c (Max.) [A]	374	432	495
length [m]	200-class	500-class	500-class
$I_c \cdot L$ [Am]	64,077	112,166	151,463

4. 謝辞

本研究は経済産業省の「超電導応用基盤技術研究開発 (II)」として独立行政法人「新エネルギー・産業技術総合開発機構」からの受託により実施された。

RE123 線材の細線加工ならびに欠陥補修接続における通電特性 Current transport in micro-filamentary and defect-repair-joining RE123 tapes

木須 隆暢, 井上 昌睦, 阿比留 健志, 本田 貴裕, MATSEKH Arkadiy, ZULKIFLI Zulistiana (九大シス情); 宮田 成紀, 山田 穰, 加藤 順子, 筑本 知子, 中尾 公一, 塩原 融 (超電導工研)
 KISS Takanobu, INOUE Masayoshi, ABIRU Kenji, HONDA Yasuhiro, MATSEKH Arkadiy, ZULKIFLI Zulistiana (Kyushu Univ.);
 MIYATA Seiki, YAMADA Yutaka, KATO Junko, CHIKUMOTO Noriko, NAKAO Koichi, SHIOHARA Yuh (SRL-ISTEC)
 E-mail: kiss@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

希土類(RE)系高温超伝導テープ線材の開発において、従来の1cm幅の標準的テープ線材の作製に加え、低交流損失化を目指した細線化や、欠陥部位の補修接続などの加工技術の確立が求められている。本研究では、試料内の電磁気特性の空間分布の観測結果を基に、細線化時ならびに補修接続時の通電特性について調べた。

2. 実験

細線加工した RE123-IBAD 線材の磁界下の通電特性を四端子法によって系統的に調べた。さらに、SQUID 磁気顕微鏡により自己磁界の侵入の様子を観測し、均一性との関係を明らかにした。

また、人為的に設けた欠陥を、超伝導線の半田接続によって補修した線材の接続部位における電流分布を、ホール素子走査型磁気顕微鏡¹⁾により評価し、印加電流に対する依存性を調べた。

3. 実験結果および考察

SQUID 磁気顕微鏡によって評価した細線化フィラメントの自己磁界の分布を Fig.1 に示す。従来プロセスと改善プロセスとを比較して示す。従来プロセスによる試料では、既に報告しているとおり磁束フロントが乱れると共に、典型的に数100ミクロン程度の間隔を有する、電流阻害因子が存在する²⁾。一方、改善プロセスでは、磁束はフィラメントエッジと平行に直線的に侵入し、均一性が著しく向上している事が分かる。これに伴って、中、低磁界中の J_c は大きく向上し、77K、自己磁界中での値は $4\text{MA}/\text{cm}^2$ に達した。すなわち、IBAD 基材上の線材の性能は、単結晶基板上的特性と同等のレベルに到達している。一方、高磁界中の J_c 値は、従来線材と改善プロセスによる線材とで、同等の値を示した。これは、高磁界での n 値の低下によって不均一性の影響が緩和されることに起因している。

テープ長手方向に対して垂直に、人為的に欠陥を設け、銀保護層を介して表面に超伝導テープを銀拡散接合することによって、欠陥部位の補修を模擬した³⁾。このような補修線材の電流分布の様子を、ホール素子磁気顕微鏡によって可視化した結果を Fig. 2 に示す。積層したテープの上面より、シート電流密度を評価した。白の破線は、下部の線材に設けた欠陥の位置を表す。低電流印加時には、あたかも欠陥が消失したように見える。これは、補修に用いた線材内のシールド電流により、欠陥を迂回する電流成分が丁度打ち消される事を示している。電流の増大と共に、下部の線材で担えない電流が、欠陥近傍で上部の補修線材に流れ出る様子が分かる。このとき、界面の銀層を電流が横切ることから、試料両端に線形抵抗が観測される。さらに、電流を増大し、下部線材の本来の(欠陥導入前の)臨界電流値に達すると、急激な電圧の立ち上がりが観測された。

4. まとめ

細線化時の特性は、中、低磁界下において空間不均一性の影響を顕著に受ける事を明らかにし、面内均一性の向上と共に中、低磁界領域の臨界電流値は大きく向上することを示した。すなわち、細線化において面内均一性の改善は本質的に重要となる。また、欠陥部位に別の線材を銀拡散接合し

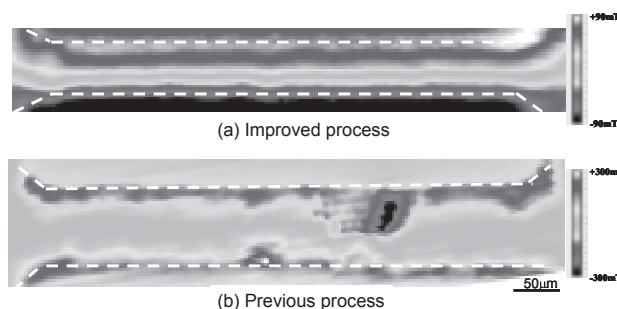


Fig. 1 Self-field distribution, which is observed by the scanning SQUID microscopy, in micro-filamentary RE-123 coated conductor obtained by the previous process and recent improved process.

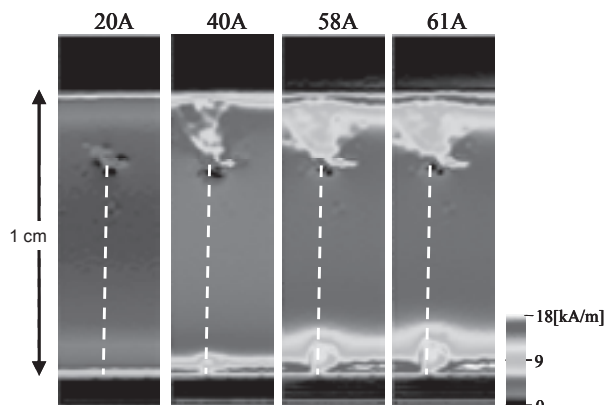


Fig. 2 Sheet current distribution around defect-repair-joint. The dotted line indicates the position of defect in bottom tape. On top of it another tape is soldered face down covering the defect. Visualized current is a summation along the thickness in both tapes.

た補修部位における電流分布について、磁気顕微鏡による観測結果を基に考察した。超伝導テープ間のシールド相互作用、ならびに印加電流の増大に伴う電流の素線間の遷移の様子を明らかにした。

以上に示すとおり、磁気顕微鏡による加工線材の評価は、プロセス開発に対する極めて有効な情報を提供できることが分かる。

謝辞: 本研究は、超電導応用基盤技術研究開発の一環として、ISTEC を通じて、NEDO からの委託を受けて実施するとともに日本学術振興会の科研費(18360153)の助成を得て行ったものである。

参考文献

- 阿比留ほか、2008年春季低温工学・超電導学会、2P-p09.
- T. Kiss et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 17, No. 2, pp. 3211-3214.
- 加藤ほか、2007年秋季低温工学・超電導学会、2A-a07.

Limiting current-carrying capacity of YBCO superconducting tape at 30T

V.R.Romanovskii^{1,2}, K. Watanabe¹, S. Awaji¹, G. Nishijima¹, H. Matsuo¹

^{*1}High Field Laboratory for Superconducting Materials, Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai 980-8577, Japan

^{*2}Russian Research Center 'Kurchatov Institute', Moscow 123182, Russia

E-mail: kwata@imr.tohoku.ac.jp

Introduction

An YBCO coated conductor is one of the superconducting materials that allow to develop the next generation current-carrying element for many practical applications. The high critical properties permit to fabricate splendid magnet systems, and the high field magnets (above 20 T) are possible. To make such a magnet, it is important to determine the current stability boundary, which define the stable value of the current flowing in a magnet. In this study, the limiting current-carrying capacity of IBAD-PLD-YBCO coated conductor with copper and silver stabilizing layers cooled by liquid helium at 30 T for B//c was estimated.

Model

To simplify the analysis, we use the zero-dimensional model to describe the uniform formation of the thermal and electric field in the cross-section of the tape that will take place during fully penetrated current states. Accordingly, this model is defined by equations

$$E = E_c (J_s / J_c(T, B))^{n(T, B)} = J_{ag} \rho_{ag}(T, B) = J_{cu} \rho_{cu}(T, B)$$

$$J = \eta_s J_s + \eta_{ag} J_{ag} + \eta_{cu} J_{cu}$$

$$EJ = q(T)p/S$$

where the heat flux to the liquid helium was fitted as follows

$$q(T)[W/cm^2] = \begin{cases} 2.15(T - T_0)^{1.5}, & T - T_0 < \Delta T_{cr} = 0.6K \\ 0.06(T - T_0)^{0.82}, & T - T_0 \geq \Delta T_{cr} = 0.6K \end{cases}$$

Here, $E_c = 10^{-5}$ V/cm is the voltage criterion used in the J_c -definition; n is the power law exponent of the E - J curve; ρ_{ag} and ρ_{cu} are the resistivity of the silver and copper layers, respectively; J is the total current density in the tape, which is equal to the sum of the currents flowing in the superconductor (J_s), silver (J_{ag}) and copper (J_{cu}) layers, respectively; $S = a(a_s + a_{ag} + a_{cu})$ is the cross-section of the tape; $p = a + 2(a_s + a_{ag} + a_{cu})$ is the cooling perimeter; $\eta_s = a_s/a$, $\eta_{ag} = a_{ag}/a$ and $\eta_{cu} = a_{cu}/a$ are the volume fraction of the superconductor, silver and copper having thickness a_s , a_{ag} and a_{cu} , respectively. The critical current density of a superconductor and n -value for the YBCO superconductor were described by the expressions reported in [1]. The resistivity simulation of the silver and copper as a function of the temperature and magnetic field was made in accordance with [2] using the residual resistivity ratio and magnetoresistivity. The study was carried out at $B=30$ T, $a_s=10^{-4}$ cm, $a_{ag}=5 \times 10^{-4}$ cm, $a=1$ cm, $T_0=4.2$ K varying the copper thickness.

Results

Under the cooling condition considered, the stable current modes of a superconducting tape are limited by the jump transition from the nucleate to the film boiling regimes. Such instability conditions were studied when the thickness of a copper layer was varied in the wide range.

The performed analysis indicates that the instability current increases practically linear with increasing the copper thickness (Fig.1). Current-sharing analysis depicts that this

current-carrying capacity variation is due to the corresponding increase of the current stably flowing in the copper layer (Fig.2). The Fig.2 indicates also the existence of the stable sharing current, which is about 0.7 A per 1 μ m copper layer thickness at 30 T. For instance, the tape with 100 μ m thick copper layer enables us to use the stable current-carrying capacity up to about 340 A, even when the critical current of the YBCO core is 172 A at 30 T and 4.2 K. As a result, the stable current sharing may occur below about 40% up of the critical current of the YBCO core at 30 T for B//c.

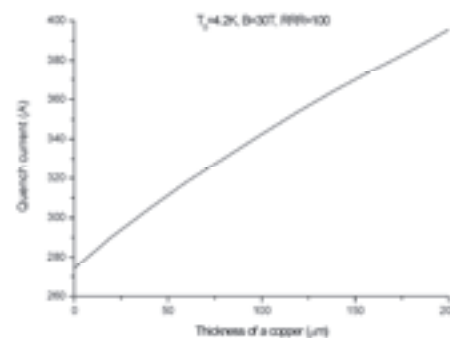


Fig. 1 Quench current vs thickness of a copper.

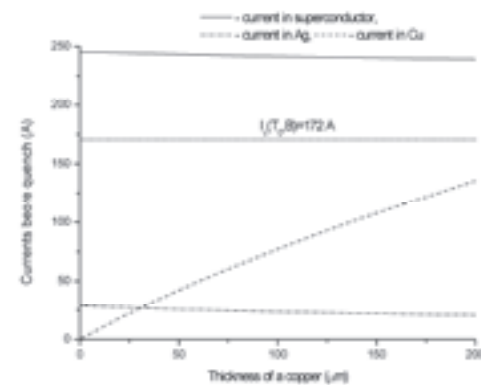


Fig. 2 Limiting currents in the layers of a tape vs thickness of a copper layer.

[1]. Inoue M., Kiss T., Mitsui D., et al. IEEE Trans. on Appl. Supercon. 2007, Vol. 17, No.2, pp.3207-3210.

[2]. Seeber B. Electrical resistivity. In "Handbook of Applied Superconductivity". Vol.1. Edited by B. Seeber. pp.1067-1082.

マグネティックパスの普及に向けて —磁気分離から磁気力制御への発展を—

For the development of Magnetic path with
Magnetic processing of separation or controlling
With magnetic force

渡辺 恒雄 (渡辺エネルギー環境研究所)
WATANABE Tsuneo (WEEI Watanabe Energy & Environment Institute)
E-mail: watanabetsuneo@nifty.com

1. はじめに

本稿では、1977年にエイモリー・ロビンズ氏により発表され、エネルギー分野で注目を集めた「ソフトエネルギーパス」を参考に、これからの磁場利用の拡大をマグネティックパス利用の社会として展望を試みる。「ソフトエネルギーパス」では、2つの論点があげられている。第一は、先進工業国でのエネルギーの用途と使用エネルギー形態の分析を行い、最終エネルギーの約58%は熱エネルギーとして消費され、その3分の2は沸騰点以下での利用であることから、化石燃料が作る高温蒸気から生成された電気エネルギーの最終使用形態としては、エネルギー効率の立場から再検討の余地があること。同時に、電気エネルギーの高度利用を図ることが重要であること。第二は、ソフトエネルギーパスは、自然エネルギーを主体とする再生可能エネルギー体系であり、資源は世界的に広く分布し、技術的には活用容易な水準の分散型設備として利用可能であり、経済的には小規模予算で実現可能であり、化石燃料及び核燃料主体のハードエネルギーパスが引き起こす諸問題の解決になるとして、将来の有力なエネルギー利用の選択肢として提案された。その後、世界的に対応が求められて来ている、地球温暖化対策や資源循環型社会の実現にも寄与し得る環境への負荷の少ないエネルギーシステムとしての評価も高まって来ている。

2. マグネティックパスの普及の期待

ソフトエネルギーパスが提起したこれらの論点を参考にすると、私達が磁場の利用拡大を図ることは、電気エネルギーの高度利用の形態として有望であり、環境への負荷の少ない資源循環型社会の実現に資することが期待される、等に整理される。講演者は、この様な21世紀という時代の要請に磁

場利用こそが答え得るとの立場から、磁場を利用して課題解決する方法を「マグネティックパス」とよぶことにしている。図1は、2007年11月12日～15日に広島市で開催された2007ICMS (International Conference on Magneto Science)で、参加者に協力を求めた磁場利用に関するアンケートの表紙である。この図は、安芸の宮島の鳥居の姿が海面に馬蹄形磁石として映えている論文集表紙絵を利用して、この磁石によってマグネティックパスの実現に向けて、虹の架け橋をかけようと呼びかけたものである。



*Let us make the
rainbow bridge
with magnet
for the future*



Fig.1 Make the rainbow bridge to Magnetic path

マグネティックパスが社会に普及して行く上で、その特徴及びメリットとして次の項目を活用することが挙げられる。

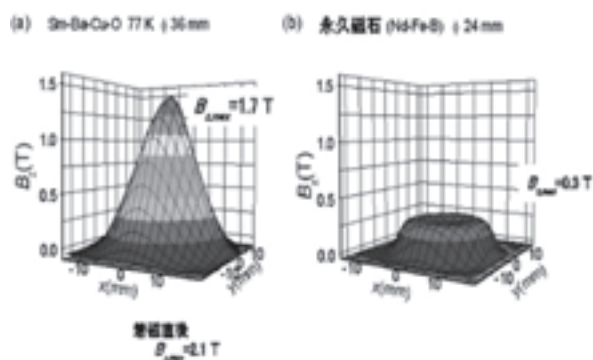
- ① 物質の磁性に応じた磁気力による操作・制御が非接触で行える。
- ② 物理的作用なので物質の劣化や変質の無い状態で操作・制御ができる。
- ③ 磁石装置の大きさによって、磁気力制御の対象範囲を自由に変えられる。
- ④ 磁石装置の設計によって、時間的・空間的な物質操作が行える。

⑤ 磁気センサーの開発によって、物質の状態を原子、分子、高分子、化合物、材料素子、構造物などの様々なレベルで分析および診断できる。

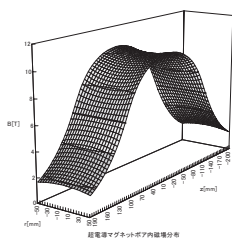
⑥ 小型の磁石装置を採用すれば、生体操作、医療の分野に適用できる。

最近、この様な磁場利用が持つ様々な特徴を活用できる条件が、磁石装置の開発によって急速に整いつつある。

図2の通り、高温バルク体磁石、永久磁石、コイル型の各磁石の発生磁束密度の最大値が大幅に引き上げられて来たので、物質に作用させる磁気力の作用範囲が広がり選択肢が増えたことである。更に小型高性能冷凍機の開発によって装置的にも省スペースでの利用が可能になったことも有利な条件になってきている。



(1) HT bulk magneto (2) Permanent magneto



(3) Coil type Magneto

Fig.2 Temporal magnetos

3. 磁気分離から磁気力制御へ

前章に整理したマグネティックパスの特徴及びメリットを活用した技術としては、1995年から2005年にかけて日本で活発に取り組まれた超電導磁石利用のプロジェクトの結果、主に環境修復や資源循環への磁気分離技術の適用によって成功を収めている。(1) その後、高温超電導バルク体の

利用を想定した生体操作や医療への適用が始まって来ているが、これらの技術は、精密な磁気力制御の範疇に属するものである。(2)この間の経緯を整理すると、環境修復や資源循環へは磁気分離技術、生体や医療へは磁気力制御技術が中核となっている。これらの技術の状況は磁場空間と磁場精度の二次元パラメーターで図3に整理される。また物質の循環サイクルの中で、磁気利用技術を位置づけると、図4の通りに上流系の高度利用、下流系の環境修復・資源化のいずれかに属する。(3)

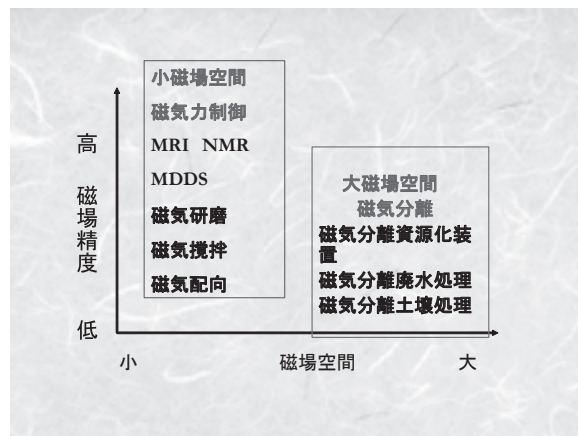


Fig.3 Profile of magnetic separation and magnetic control

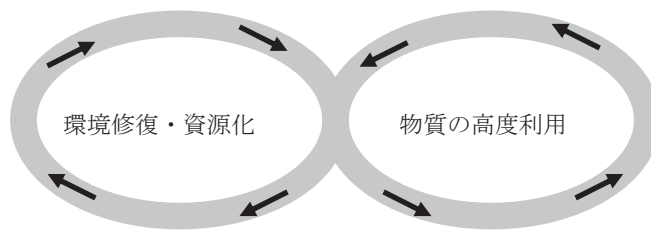


Fig.4 Circulation of materials

4.さいごに

近年は各種の磁石装置を分散型処理装置として利用でき、マグネティックパスが花開く時期に来ている。これからは、物質循環のサイクルに合わせた磁気利用が大いに発展することが期待される。特に物質の下流系の処理に見合う経済的な磁石装置の開発と上流系の高度利用に資する精密制御技術の開発が期待される。

参考文献

1. 電気学会技術報告書第 932(2003 年)
2. 2008 年度電気学会全国大会シンポジウム S10(2008年)
3. 新日本製鐵 2007 環境・社会報告書を参考

海洋生態系保全のための水生生物の磁気分離に関する基礎的研究

Fundamental study on magnetic separation of aquatic creatures for marine ecosystem preservation

坂口 芙美、秋山 庸子、泉佳伸、西嶋 茂宏(阪大)

SAKAGUCHI Fumi, AKIYAMA Yoko, IZUMI Yoshinobu, NISHIJIMA Shigehiro(Osaka Univ.)

E-mail:f-sakaguchi@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

現在、地球規模の環境変化や養殖魚介類の移植などが原因で、外来水生生物による海洋生態系の破壊・攪乱という問題が起きている。その対策として、本研究では、高速処理が可能で、装置が比較的コンパクトにできる磁気分離法を水生生物の処理に応用することを検討した。

被分離物質である水生生物は強磁性を持たないため、高速処理のためには、被分離物質に強磁性粒子を付着させて強磁性を付与する担磁技術が重要となる。少量の薬剤添加で、高効率の磁気分離法を実現するため、強磁性粒子と水生生物との間の相互作用についての検討が必要である。ここでは、水生生物の担磁が可能であるかを確認するとともに、マグネタイトの種類による水生生物の分離率の違いを調べた。さらに、水生生物とマグネタイトとの間の相互作用について検討した。

2. 実験方法

モデル生物として植物性海洋プランクトンであるテトラセルミスを用い、3種類のマグネタイトを用いて磁気分離実験を行った。テトラセルミス懸濁液 (1.5×10^6 cells/ml、ヤンマー船用システム)を人工海水で10倍希釈し、これを模擬海水とした。マグネタイトは市販のマグネタイト A, B, C (それぞれ粒径 $0.13 \mu\text{m}$ 、 $0.2 \mu\text{m}$ 、 $0.5 \mu\text{m}$)を用いた。模擬海水 50ml にマグネタイト 0.1~0.5g を添加して、プロペラを用いて5分間かくはんし、ネオジウム磁石を用いて分離した。分離後の溶液を10倍に濃縮し、紫外可視分光光度計で 679nm での吸光度を測定し、分離率を求めた。

親水性相互作用について検討するため、テトラセルミスの赤外吸収スペクトル測定と、マグネタイトの接触角測定を行った。また、静電的相互作用について検討するため、テトラセルミスとマグネタイトのゼータ電位を測定した。

3. 結果と考察

分離実験から、テトラセルミスの担磁が可能であることが確認できた。測定した分離率の結果を Fig.1 に示す。マグネタイト B, C が比較的高い分離率を示した。また、マグネタイト A ではマグネタイト濃度依存性がみられたが、マグネタイト B, C ではみられなかった。そこで、マグネタイトの種類による分離率の違いについて検討した。

テトラセルミスとマグネタイトとの相互作用として、親水性あるいは静電的相互作用が考えられる。親水性相互作用についての検討では、テトラセルミスの赤外吸収スペクトル測定から、親水性の水酸基、アミノ基が多くみられ、テトラセルミス表面は親水性であると考えられる。また、接触角測定から、分離率の高いマグネタイト C の疎水性が高く、テトラセルミスとマグネタイトの相互作用は親水性相互作用ではないと考えられる。さらに、静電的相互作用についての検討では、ゼータ電位測定から、テトラセルミス、マグネタイトは共に表面に負の電荷を持っており、相互作用は静電的相互作用ではないと考えられる。

水生生物とマグネタイトとの相互作用を解明するため、今後、生物細胞を破壊しない方法での表面特性評価など、検討を続ける予定である。相互作用を解明できれば、マグネタイトの添加量を低減でき、効率のよい磁気分離が可能になると考えられる。

謝辞:この研究の一部は住友電気工業(株)の支援を受けて行われた。

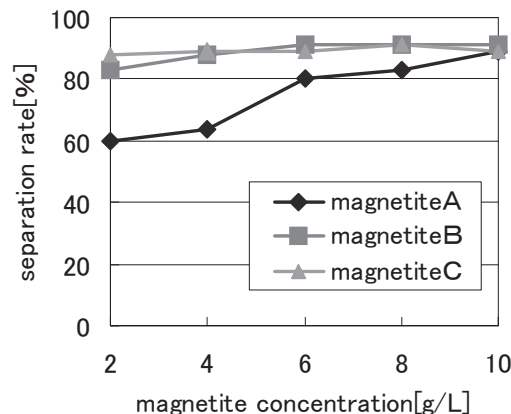


Fig.1. Relation between magnetite concentration and separation rate

Table.2. Contact angle and Zeta potential of tetraselmis and magnetite

	tetraselmis	magnetite		
		A	B	C
Contact angle[degree]		22.6	27.4	143.5
Zeta potential[mV]	-19.2	-17.4	-14.2	-34.1

エマルジョン磁気分離に関する基礎的研究 Fundamental study of magnetic separation of emulsion

方 美娜, 寺田 隆哉, 三島 史人, 秋山 庸子, 泉 佳伸, 西嶋 茂宏 (阪大)

FANG Meina, TERADA Takaya, MISHIMA Fumihito, AKIYAMA Yoko, IZUMI Yoshinobu, NISHIJIMA Shigehiro

E-mail: fangmeina@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

工業廃水や生活廃水には多くの油分が含まれている。廃水中の油の状態は大きく浮上油、分散油、乳化油に分かれているが、中でも乳化油は安定的な分散状態を長期間保っているため、処理が最も難しいと言われている。乳化油に対する代表的な処理方法は凝集剤を添加してフロックを形成した上で、浮上させることであり、処理は出来るが、大規模の設備が必要であると言う問題点が存在する。これに比べて磁気分離による廃水処理は常磁性物質や反磁性物質に強磁性粒子を付着することさえ出来れば、大量高速処理も可能である特徴を有する。

本研究では乳化油のモデル系として、シクロヘキサンのエマルジョン模擬廃水を調製し、磁気分離による処理効果を検討したので、その結果を報告する。

2. 磁気分離装置

本実験では永久磁石とバルク磁石を用いて磁気分離を行った。Fig. 1 は今回作成した磁気分離装置の写真、Fig. 2 は磁気分離装置の模式図である。

永久磁石を用いて実験を行った場合はフィルターを設置した。今回の実験で使ったフィルターは線径は 0.8mm、線間距離は約 0.5mm で、素材は鉄である。

バルク磁石を用いた場合はフィルター無の場合も分離効率が良好であったため、フィルターを使わなかった。Table 1 に今回の実験で用いた磁石の性質と流路の幅を示した。

3. 実験

表面活性剤 0.1g にシクロヘキサン 2.0g を加えて超音波分散させた後、蒸溜水 200ml を加えてホモジナイザで乳化させ、エマルジョン模擬廃水を調製した。調製したエマルジョン模擬廃水に硫酸アルミニウム 6ml、サンフロック 2.5ml、マグネタイト 0.25g 添加して後攪拌した後磁気分離装置に流した。

永久磁石を用いて実験を行った場合は 30ml/min の流速で 30 秒間流した。バルク磁石を用いて実験を行った場合はおよそ 120 ml/min、216 ml/min、430ml/min の流速で 30 秒間流した。

4. 結果と考察

担磁操作において、凝集剤とマグネタイトを添加した後、永久磁石を近づけると、形成した磁性フロックは磁石に引き寄せられた。Fig. 3 は原水と担磁処理した後、下部に永久磁石を近づけた場合の写真である。磁性フロックの凝集力は大きく、磁石を離して数日間経ってもフロック状態を維持していた。

分離操作においては、永久磁石を用いた実験で、フィルター 2 枚を加えて実験を行った場合の処理水は透明であった。バルク磁石を用いて分離実験を行った場合、流速が 430ml/min であっても分離効率は高く、COD の検出限界以下であった。Table 2 はバルク磁石を用いて実験を行った場合の処理前と処理後の COD を示す。

今回の実験を通して、磁気分離によるエマルジョン模擬廃水の高速度処理が可能であることが明らかになった。マグネタイトの循環利用を考えると共に、さらに多様な担磁法を工夫することで、幅広い油分廃水の処理法として磁気分離法が利用可能な技術であると考えられる。今

後は担磁法の確立を目指すとともに、具体的なシステムを考案することを計画している。



Fig. 1. Photograph of experimental set up

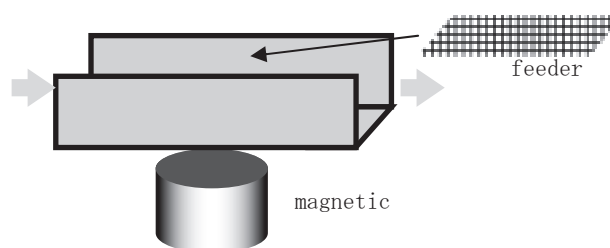


Fig. 2. Schematic illustration of experiment

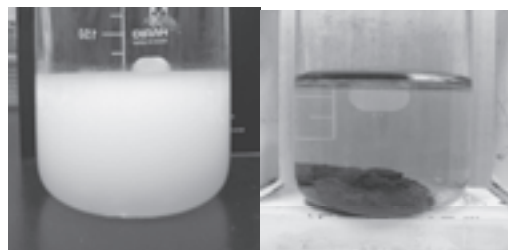


Fig. 3. Photograph of emulsion before and after magnetic separation

Table 1 Magnet parameter and width of lauder

磁石種類	直径	高さ	表面磁束密度	流路
永久	30mm	15mm	0.3T	10mm
バルク	45mm	15mm	2.2T	30mm

Table 2 COD and TOC before and after Magnetic separation with HTS

	処理前	処理後
COD (ppm)	24.7	n. d.
TOC (ppm)	1700.0	23.3

謝辞

本研究にあたり、ご協力いただきました岩手大学工学部材料物性工学科、藤代博之教授に感謝いたします。

参考文献

- 低温工学会：第76回 2007 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集、p. 4

電磁力を利用した溶融金属内不純物分離に関する基礎的研究

Fundamental Study on Separation of Inclusion in Molten Metal by Electromagnetic Force

寺田 隆哉, 三島史人, 秋山庸子, 泉佳伸, 西嶋茂宏 (阪大)

TERADA Takaya, NISHIMA Fumihito, AKIYAMA Yoko, IZUMI Yoshinobu, NISHIJIMA Shigehiro

E-mail: t-terada@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

金属内に残留する不純物は製品の機械的性質に悪影響を及ぼす要因である。そのため金属生産過程において溶融金属内不純物を分離する技術が重要である。溶融金属内の不純物を分離する方法には比重差を利用して沈降または浮上させる重力分離やフィルタを利用した吸着ろ過分離が挙げられる。しかし、重力分離では分離に長時間を要する、吸着ろ過分離ではフィルタの網目を細かくしなければいけないため流速が低下するといった問題がある。そこで電磁気力を利用した分離(電磁分離)方法に着目した。電磁分離では力の制御が容易にでき、重力分離などこれまでの手法と組み合わせた装置設計も可能であるという特長を有している。

これまでいくつかの電磁分離に関する研究が報告されているが実用化には至っていない。その要因として磁場発生源に電磁石を利用しているため分離に必要な電磁力が十分得られていないことが考えられる。電磁力は電流密度と磁束密度の外積に比例するため、力を大きくするにはどちらかを大きくする必要がある。そこで本研究では HTS バルク磁石を利用した電磁分離法について検討した。

2. 原理

溶融金属に電流密度 J の直流電流と磁束密度 B の磁場を印加すると電磁力 $F = J \times B$ が作用し圧力勾配を生じる。溶融金属内に絶縁物質が存在していた場合、この圧力勾配によって電磁力とは反対向きに電磁アルキメデス力が作用する。電磁アルキメデス力の大きさは球形で体積 V の絶縁物質の場合 $F_p = 0.75(J \times B)V$ となることがわかっている。比重 ρ_i の溶融金属内に沈んでいる比重 ρ_p の絶縁球体を浮上させたい場合は浮力と重力の差 $(\rho_p - \rho_i)Vg$ より電磁アルキメデス力 F_p が大きくなるような電流密度と磁束密度を印加すればよいことがわかる。

3. 実験方法

今回の実験では溶融金属内に沈んだ絶縁球体の浮上を試みた。溶融金属は(株)大阪アサヒメタルの U アロイ 70 を使用した。U アロイの融点は 70°C 、比重は 9.2、電気抵抗率は $10^{-7} \sim 10^{-8} \Omega\text{m}$ 、 70°C での粘度は 3cP であった。また、絶縁球体として直径 3mm の鉛球にテフロンコーティングしたものを使用した。用意した球体の比重はおおよそ 10.8 であった。また、磁場発生源には岩手大学藤代研究室の HTS バルク磁石を使用した。磁石の大きさは直径 45mm 高さ 15mm で真空容器表面での最大磁束密度 2.4T であった。

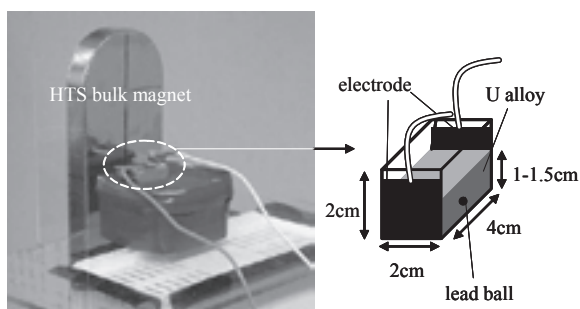


Fig.1 Photograph and schematic diagram of experimental unit

Fig.1 に実験装置全体図を示す。大きさ $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ の銅板電極を電極間距離 4cm に配置した容器を用意した。この容器に約 100°C の U アロイ 70 を容器底面から高さが $1\text{--}1.5\text{cm}$ となるように入れ、超伝導バルク磁石にできるだけ近づけて置いた。容器位置の磁場は $0.14 \sim 1.2\text{T}$ であった。絶縁被覆した鉛球体を 3,4 個 U アロイ 70 の中に入れ、その後 U アロイ 70 に直流電流を流した。電流の大きさは $0, 1, 10, 30\text{A}$ とした。U アロイ 70 が完全に固化したのを確認するまで約 20 分間電流を流し続けた。その後固化した U アロイ 70 を回収し、切断研磨して表面観察にて鉛球体の位置を確認した。

4. 結果と考察

Fig.2 に切断研磨した U アロイ表面の様子を示す。Fig.2 の左は 0A の電流、右側は 30A の電流を流したときのサンプルを切断したものである。今回の実験では容器上部から観察して完全に浮上した鉛球体を確認することができなかった。 0A 、 1A のサンプルでは Fig.2 の左図のように投入した鉛球体はすべて底面に沈んでいたのに対し、 10A 、 30A のサンプルでは Fig.2 の右図のように若干浮上している鉛球体もみられた。

今回の実験条件で用いた U アロイと絶縁被覆した鉛球体の比重から考えると、完全に浮上させるのに必要な単位体積あたりの力はおおよそ $1.6 \times 10^4 \text{N/m}^3$ と計算できる。一方、電流密度と磁束密度の大きさから計算される単位体積あたりの電磁アルキメデス力はおおよそ $3.0 \times 10^3 \sim 9.0 \times 10^4 \text{N/m}^3$ であった。 10A と 30A のサンプルの一部は電磁アルキメデス力が比重差から求めた浮上に必要な力を上回るという計算結果となり、若干浮上しているものもみられたという実験結果と対応していた。しかし、力の釣り合いを考えると完全に浮上するはずであり、この原因として電流密度、磁束密度に分布が存在していることや被覆した鉛球体の表面の濡れ性、電極や容器壁面との接触部分で一部 U アロイが固化している等が考えられる。

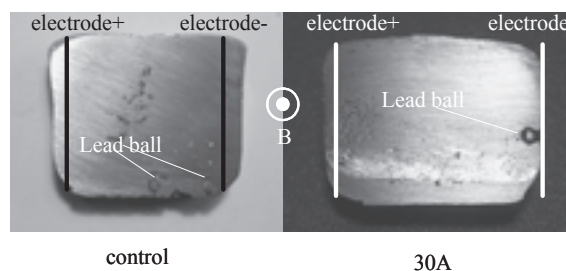


Fig.2 Photograph of cut and ground U alloy

5. 結論

HTS バルク磁石を使った電磁分離では溶融金属中の絶縁球体の動きを完全に制御することができなかった。発表ではソレノイド型超伝導磁石を使用して均一な強い磁場下で実験を行い、その結果についても報告する。

HTS バルク磁石を用いたドラム缶洗浄廃液磁気ろ過システムの開発

Development of magnetic filtration system using HTS- bulk magnet for wash water of drum

三島 史人, 寺田 隆哉, 秋山 庸子(阪大院工), 飯野 勝彦, 植田 博行(日本板硝子エンジニアリング(株))

大西 徹造(中央産業(株)), 小林 豊, 大西 豊(関西ドラムセンター), 西嶋 茂宏(阪大院工)

MISHIMA Fumihito, TERADA Takaya, AKIYAMA Yoko (Osaka Univ.), IINO Katuhiko, UEDA Hiroyuki (NSGE), OHNISHI Tetuzo (Chuo Sangyo CO.,LTD.), KOBAYASHI Yutaka OHNISHI Yutaka (Kansai Drum Center Joint Business Cooperatives) and NISHIJIMA Shigehiro (Osaka Univ.)

E-mail : f-mishima@qb.sec.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

ドラム缶廃棄物の野積みなどの環境悪化が問題となり、再生缶の利用が注目されている。しかしドラム缶1本当たりの洗浄に利用する水は70リットル、国内ドラム缶洗浄工場だけでも現状で1350万本あり、年間、約100万トンの洗浄水が消費されている。

洗浄するドラム缶は化学会社、石油会社、食品会社、薬品会社等で使用されたものであり、洗浄するときに発生する種々の油分、薬品等を含んだ混合廃水を対象としているため、その洗浄水の処理には困難が伴い、産廃として処理されたり、放流されたりしているのが現状である。この廃水を適切に処理・再利用することが可能となれば、環境保全に貢献するのみならず、工業用水の使用量を減少させ、経済的メリットも期待できる。

そこで本研究では磁化シーディング機で、洗浄廃水の不純物成分を、マグネタイトを含むフロック化した後、HTSバルク磁石の近傍を通過させることで、磁気力によりろ過する磁気分離システムの開発を行っている。

2. ドラム缶洗浄廃水

洗浄廃水はアルコール系溶剤、油、界面活性剤などの混合廃水である。現状では下水基準の処理水をほぼ100%放流しているが、磁気ろ過器を開発しドラム缶洗浄水を再利用できるレベルまで浄化することを目標としている。洗浄水のCODはその洗浄対象物によって日時差が激しく現状での主な値は200~500ppmであり、この分に関しては50ppm以下に処理することが可能である。すすぎ水として一部利用可能とし、将来的には工業用水並の10ppm以下とし、100%の再利用を目指している。

3. 磁気清澄システム

清澄システム開発のためには、①磁化シーディング過程、②磁気ろ過器が必要となる。①磁化シーディング過程とは、COD成分を強磁性体微粒子と一緒にフロック化する技術

であり磁性の弱い物質に強磁性を付与することが可能である。②の磁気ろ過部は、永久磁石とHTS(高温超伝導)バルクを用いたろ過器であり、磁気シーディングされた、大きいフロックについて永久磁石部でろ過し、それ以外についてはHTSバルク部の強力な磁気牽引力を用いて精密ろ過を行なう。この方法により洗浄水中の混合廃液のCOD成分を高効率で急速ろ過することが可能である。

従来にはないこのシステムは安価、操作が容易、拡張性がある等の特色がある。そのシステム概要を図1に示す。

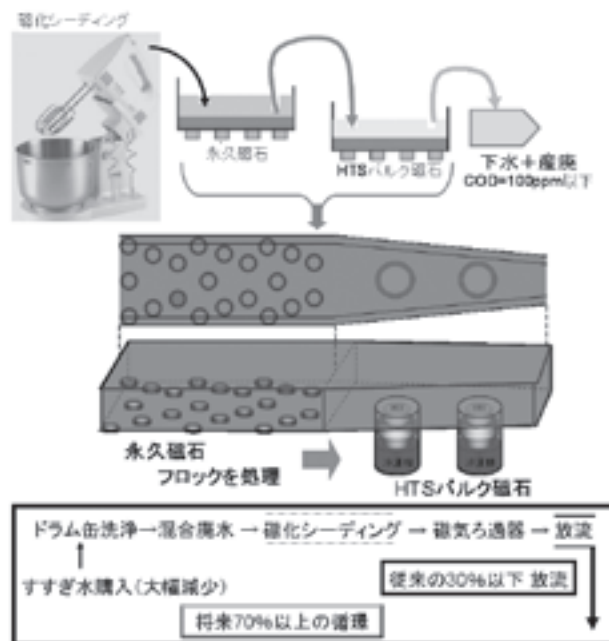


Fig.1 Schematic illustration of the magnetic filtration system.

4. まとめ

本装置の処理水はすすぎ水として、新規工業用水の購入量を減少でき、その経済性は大きい。また本設備の流通経路も確保できており、短期間で普及する可能性がある。将来的には種々の化学工業界の廃水処理や工場の廃水で汚染されている中国や東南アジア諸国の河川や湖の環境改善に展開できる技術であり、本年度中での開発を目指す。

磁化活性汚泥法による下水高度処理プロセスの パイロットプラントスケールでの検討

Examination by pilot plant scale of advanced sewage treatment process by magnetic activated sludge process

渡辺 俊介, 酒井 保藏(宇都宮大);サハ ミヒル ラル(ダッカ大)

WATANABE Shunsuke, SAKAI Yasuzo (Utsunomiya Univ.); SAHA Mihir Lal (Dhaka Univ.)

E-mail: sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

霞ヶ浦など閉鎖性水域へ放流する場合の水処理プロセスでは、有機物の除去だけでは窒素やリンなど過度の栄養塩による富栄養化の進行を防止することができない。栄養塩の除去までを目的とした水処理は高度処理と呼ばれるが、我々は汚泥滞留時間が無限大で硝化菌の増殖に有利な磁化活性汚泥法の特徴を活用し、有機物と窒素を除去できる簡便な水処理プロセスをパイロットプラントを利用して検討してきた。これらの成果をまとめて報告する。

微生物機能を活用した廃水中の窒素除去プロセスは古くから検討されているが、Fig.1 に示すように複雑な処理フローが要求される。有機物の除去は好気条件を維持し、有機物を酸化分解させるだけでよいが、生物学的窒素除去では、好気条件で NH_4^+ (アンモニウムイオン) を NO_3^- (硝酸イオン) に酸化した後、嫌気条件で水素供与体(例えば酢酸やメタノール)を加え NO_3^- から酸素を引抜き、 N_2 ガスに還元するプロセスが必要である。酸化過程を硝化と呼び、還元過程を脱窒プロセスと呼ぶ。両プロセスは微生物や至適条件が異なり、また、硝化過程では pH が酸性に、脱窒過程では pH がアルカリ性にシフトするため逆の pH 制御が必要である。

磁化活性汚泥法は磁性粉を活性汚泥微生物に吸着させ、磁気力で微生物と水の分離をおこなうプロセスである。この方法では、沈降分離に比べ大量の微生物を曝気槽に保持できるだけでなく、余剰汚泥の引抜きをおこなわないため、増殖の遅い硝化菌も曝気槽に十分に保持できる。そのため、シンプルで一槽のみとして、間欠曝気をおこなうことで、好気時(曝気中)は有機物と NH_4^+ の酸化を進行させ、嫌気時(曝気停止中)は NO_3^- の還元を進行させることができる。pH 変化も両反応を交互におこなわせることで相殺され、pH 制御は不要となる。パイロットプラントは Fig.2 に示すように、磁気分離と沈殿槽を組み合わせたハイブリッド式磁化活性汚泥法になっているが、このプロセスにおいても同様に間欠曝気、一槽式のシンプルな高度処理プロセスを構築できると考えた。

2. 実験方法

実験は、主に 2003 年から運転している磁化活性汚泥法による下水処理パイロットプラント(曝気槽容積 7.5 m^3)を用いておこなった。下水は一定流量(曝気槽滞留時間約 12 時間)の連続流入とし、曝気槽は間欠曝気をおこなった。窒素除去率の改善を目指して、下水の曝気槽への流入部に約 200L の嫌気部を設ける実験も検討した。また、養豚廃水処理で試みられた回分式磁化活性汚泥パイロットプラント(曝気槽 5 m^3)と実プラント(50 m^3)の結果と比較した。養豚廃水処理では廃水の流入と排出を交互におこなう回分式運転をおこない、間欠曝気を導入した。JIS 法に従って COD_{Cr} 、 COD_{Mn} 、BOD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 等を測定した。

3. 結果と考察

下水処理パイロットプラント試験では、単一槽の間欠曝気処理では 1 時間曝気/1 時間非曝気の条件で約 70% の窒素除去率を得た。流出水 COD_{Cr} 濃度は約 20 mg/L 、BOD 濃度は

約 12 mg/L であった。単一槽への間欠曝気の導入だけで、有機物と窒素を同時に除去する高度処理プロセスが構築できることがパイロットプラントスケールで実証できた。このプロセスは余剰汚泥の引抜きや、汚泥濃度管理、汚泥沈降性の監視も不要であり、発展途上国などでも十分に機能する高度水処理法として期待される。また、間欠曝気の導入は、活性汚泥法プロセスで最も電力を消費するといわれる曝気ブローアの省エネにも貢献できると考えられる。

窒素除去率の向上や、負荷変動に対する脱窒率の安定化を目指し、曝気槽の一部に嫌気部を設け、磁気分離された汚泥と流入水が、まずそこで混合してから曝気槽に送られるようにしたプロセスについても、現在、曝気条件などを変えて効果を調査中である。

また、養豚廃水パイロットプラントでは 91% の窒素除去が行なえ、50 m^3 の実プラントでも 86% の窒素除去をおこなうことができた。下水処理プラントより窒素除去が高率であるのは、廃水を曝気停止に合わせ断続的に流入し、脱窒プロセスを効率よくおこなわせているためと考えられる。下水処理においても同様に下水を断続的に流入させることで脱窒率の向上につながる可能性がある。

4. 今後の展開

下水処理パイロットプラントスケールでは、余剰汚泥の引き抜きも必要無く、窒素と有機物除去を同時におこなえ、良好な結果が得られた。この方法をさらに検討し、磁化活性汚泥法による高度処理の標準フローの確立を目指したいと考える。

謝辞: 本研究は科学研究費基盤研究(A)18201011、H15、16 年度群馬県産学官連携補助金の支援を受けた。また、養豚場におけるフィールド試験は関東電化産業(株)、(株)ヤマトとの共同研究としておこなった。

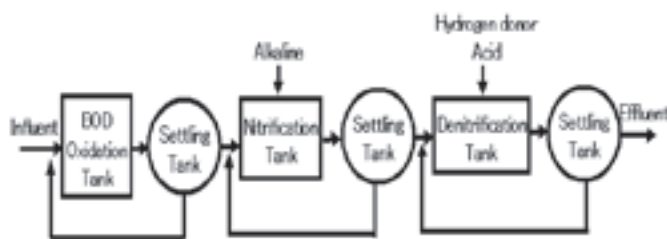


Fig.1. A fundamental organic compounds and nitrogen removal process by activated sludge

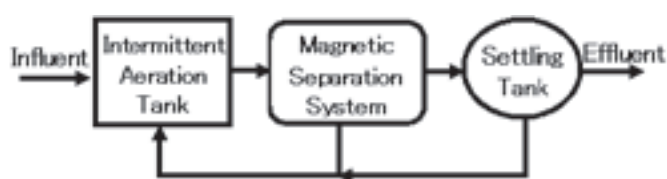


Fig.2. An organic compounds and nitrogen removal process by magnetic activated sludge

ジルコニウム・フェライト吸着剤と磁気分離による排水中のリンの浄化・回収と再資源化II —吸着時間の検討—

REMOVAL OF PHOSPHATE FROM WASTE WATER AND RECYCLING WITH ZIRCONIUM FERRITE ADSORBENT USING MAGNETIC SEPARATION II

伊藤 大佐, 西村 憲治, 三浦 大介(首都大)
ITO Daisuke, NISHIMURA Kenji, MIURA Osuke (TMU)
E-mail: dai@eei.metro-u.ac.jp

1. はじめに

東京湾等の閉鎖水域の富栄養化が深刻な問題になっており、流入する排水中のリンや窒素の浄化が緊急で重要な課題になっている。また、リン資源は米国やモロッコに偏在しており、2030年頃には枯渇すると推定されている。我が国は全面的に輸入に頼っており、リンの回収とその再資源化も重要な課題である。

リンに対し優れた吸着特性を示し、再生処理により繰り返し使用出来る吸着剤として、筆者等はジルコニウムフェライト $ZrFe_2(OH)_8$ についてその磁化特性等を調べてきた [1]。その結果、この吸着剤が強磁性 (フェリ磁性) を示し、特別な担磁を行わなくても、そのまま磁気分離に適した吸着剤であることが明らかになっている。

高勾配磁気分離技術を排水の浄化に適用すると、濾過法などと比べてリンの浄化・回収の桁違いの高速化が可能になる。そこで、この特長を生かすため、下水処理場で浄化された大量の放流水中に含まれるリンの浄化・回収を想定して検討する。

2. 目的

東京湾の場合、流入する川沿いには、いくつもの下水浄水場が存在するが、これらの浄水場で浄化された水中のリンをジルコニウムフェライト吸着剤を用いて磁気分離により高速で浄化・回収することを想定する。下水は処理場で一般に、沈砂池 → 第一沈殿池 → 反応槽 → 第二沈殿池 → 塩素接触槽 という過程を経て浄化され、川や海へと放流される。この最後の塩素接触槽の前段にリン吸着槽を設け、ジルコニウムフェライト吸着剤を添加し、リン酸を吸着させることにする。この槽の出口に磁気分離装置を設置し、リンを吸着したジルコニウムフェライト吸着剤を回収する。

3. 実験

ジルコニウムフェライト吸着剤のリンに対する吸着特性を、市販のジルコニウムフェライト粒子 (商品名: セプトール P) を試料とし、その吸着時間依存性を測定した。吸着剤粒子は粒径が 0.7mm に揃う様にバインダーで成型されている。3mg/L のリン酸濃度の試料水に、吸着剤を 600 ppm 投入し実験を行った。フィルターは磁性ステンレス (SUS 430) 細線の直径は 100 ミクロンで、印加磁界は 6 T である。

4. 結果と検討

除去率の攪拌時間依存性を図 1 に示す。バインダーの影響もあるかもしれないが、90%以上の除去率を得るためには、50分以上の吸着時間が必要であることがわかる。現行の下水処理場で浄化される前の下水には約 3 ppm のリンが含まれている。微生物による高度処理 A20 法を反応層で行うと、そのうちの約 2ppm 相当のリンが浄化される。その結果、放流水中のリンは基準値の 1ppm 以下に浄化され東京湾に流れ込む。この 1 ppm は 1 日の処理水量が百万立方メートル級の処理場の場合、1 ton/日に相当

し、全処理場の放流水中のリンを合算すると 5-6 ton/日ものリンが毎日、東京湾に注ぎ込まれていることになる。したがって、全処理場の放流水中のリンをジルコニウムフェライト吸着剤を用いた磁気分離により浄化すれば、上述のリン吸着槽で 50 分吸着させることにより、その量を更に 90%減らせることが出来ることになる。

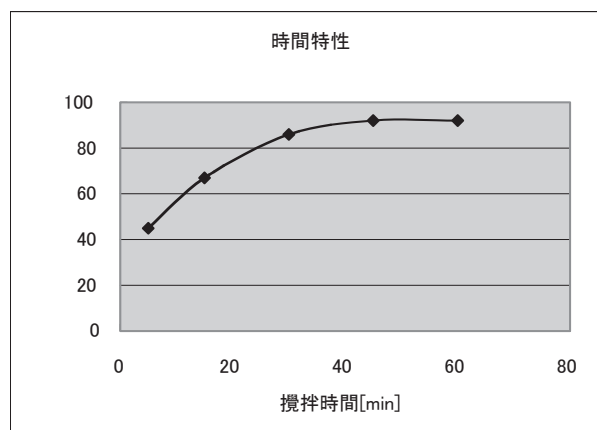


図1 ジルコニウムフェライト吸着剤によるリンの除去率の吸着時間依存性

Fig. 1 Adsorption time dependence of phosphate removal ratio

5. まとめ

東京湾の生態系の修復には下水処理体系の見直しが必要で、リンについては現行(2003年)の6割の削減が必要であるという試算もある[2]。本研究の結果、ジルコニウムフェライト吸着剤を用いた磁気分離による下水処理場放流水からのリンの浄化・回収が、このような要請に十分答えることの出来る技術であることが明らかになった。

参考文献

1. 鶴川将大, 西村憲治, 三浦大介, 伊藤大佐: 第 77 回 2007 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, p. 131
2. 松村剛, 野村英明: 月刊海洋, Vol.35, 7, p. 461(2003)

謝辞

試料を提供して頂いた日本エンバイロケミカルズ社に謝意を表します。

簡易ろ過法と組み合わせた磁化活性汚泥法による畜産廃水浄化の試み

Examination of dairy wastewater purification by magnetic activated sludge process combined with primary filtration

堀井 克浩, 酒井 保藏, 柏寄 勝(宇都宮大)

HORII Katsuhiko, SAKAI Yasuzo, KASHIWAZAKI Masaru (Utsunomiya Univ.)

E-mail: sakai@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

地下水の硝酸性窒素濃度は環境基準達成率の中で突出して悪く、農畜産廃水の規制強化が予想されている。畜産廃水浄化は個々の農家単位の分散型水処理になるため、簡便で安定した水処理法が要求される。我々は磁化活性汚泥法(MAS process)を簡易ろ過法と組み合わせ、余剰汚泥を抑制し、維持管理容易な水処理プロセスを構築することをめざす。本発表では、簡易ろ過のろ液をベンチスケールの磁化活性汚泥法で水処理をおこない、水処理性能などについて検討をおこなった。

2004年から畜産廃水の地下浸透が禁止され、畜産農家でも水処理が必要となった。通常、畜産廃水浄化には活性汚泥法の適用が考えられる。活性汚泥とは、好気性微生物が有機物を分解しながら増殖し、沈降性の良好なフロックとよばれる凝集体を形成するものをいい、この性質を利用して微生物により水処理をおこなう方法を活性汚泥法とよぶ。活性汚泥は、静置すると凝集・沈澱する性質も持っているため、フロックと上澄水が分離できる。しかし微生物の沈降性の維持には専門知識が必要で、運転管理が難しいといわれる。また、窒素除去をおこなうには、さらに複雑なプロセスが必要となる。

我々が研究を進めている磁化活性汚泥法は、通常の活性汚泥に磁性粉(Fe_3O_4)を添加することにより、活性汚泥と処理水を磁気分離する。これにより、高濃度の汚泥を曝気槽に保持し、余剰汚泥を抑制でき、硝化・脱窒プロセスが構築しやすい、バルキングなど固液分離トラブルが原理的にない等のメリットがある。このことにより従来の通常処理法より維持管理が簡単になり、農業廃水などの小規模分散処理プロセスへの適用が期待できる。

2. 実験方法

宇都宮大学附属農場の畜産廃水処理施設の処理フローをFig. 1に示す。牛頭数は50匹、一日に $3m^3$ の廃水を処理している。この処理施設は、簡易ろ過と活性汚泥法を組み合わせた水処理法をすでにおこなっている。簡易ろ過処理では、使用したもみからは、月に1回、回収され、コンポスト化(堆肥化)される。

簡易ろ過は1日1回散水され、懸濁物質がろ過される。ろ液は一時、調整槽に貯留され、間欠曝気のタイミングに合わせて $3m^3/d$ で断続的に間欠曝気槽($40m^3$)に送られる。その後、連続曝気槽($9m^3$)に送られ、最終的に沈降分離され、上澄みは放流され、沈澱は一部が余剰汚泥として引き抜かれ、大部分は曝気槽に戻される。間欠曝気槽では生物学的硝化、脱窒による窒素除去をおこなうため、メタノールを電子供与体として添加している。活性汚泥法部分に磁化活性汚泥法を導入することを目指して、簡易ろ過後の実廃水を調整槽からサンプリングし、Fig. 2に示すベンチスケールの磁気分離装置により水処理実験をおこなった。廃水の滞留時間は14日とした。単一槽での間欠曝気による有機物、窒素同時除去の可能性を検討するため、メタノールの添加、pHの調整、汚泥引き抜きをおこなわないで連続的な水処理実験をおこなった。

3. 結果と考察

現在の畜産廃水処理施設の間欠曝気槽、連続曝気槽における汚泥の状態は、MLSS: 5700 mg/L 、MLVSS: 4300 mg/L 、SV30: 96%、SVI: 180 ml/g である。沈降分離は難しい状況にあると考えられる。メタノールの添加や、処理水の環境

基準を満たすために、多量の水による希釈など、かなりのコストが必要とされている。また、汚泥濃度の適正管理や沈降性の監視などが必要であり、農家が簡単に管理できるプロセスとしては改善の余地があると考えられる。

この活性汚泥に磁気シーディングをおこない、磁気分離テストをおこなったところ、通常の活性汚泥と同様に、磁気シーディング、磁気分離について問題なくおこなうことができた。次に、畜産廃水処理プラントから廃水をサンプリングし、Fig. 2に示す実験装置により、処理実験をおこない、有機物の分解、窒素除去能、汚泥増殖速度などを測定した。磁化活性汚泥法では、メタノールの添加も、磁性粉の追加もおこなっておらず、さらに余剰汚泥の引抜きも不要であり、維持管理の簡便さや、コストの面で優位性が示唆される結果となった。

現状では、懸濁物質、リン、COD_{Cr}除去については、まだ排出基準に達しておらず、改善の余地が残されている。これらの問題点を改善し、簡易ろ過法と組み合わせた磁化活性汚泥法パイロットプラントへの研究のステップとしたい。

謝辞: 本研究は科学研究費基盤研究(A)18201011の支援を受けた。

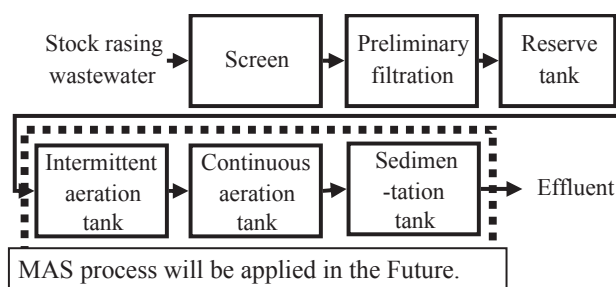


Fig.1. Flow of Stock Raising Waste Water Treatment

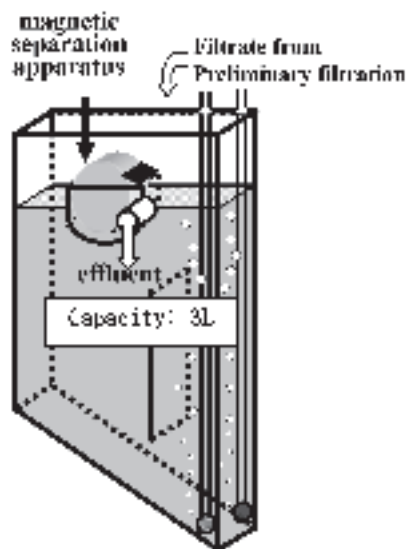


Fig.2. Experimental apparatus of MAS process

磁気力を利用した汚泥濃縮・脱水プロセスとその応用

Efficient process of sludge thickening and dewatering using magnetic force and the application of the sludge

酒井 保藏, 飛弾 正崇, 岩渕 和則(宇都宮大)

SAKAI Yasuzo, HIDA Masataka, IWABUCHI Kazunori (Utsunomiya Univ.)

E-mail: sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

磁気力を利用した汚泥濃縮・脱水プロセスはフィルタープレスなどの圧搾や、遠心分離と原理が異なり、実用例、研究例は少ない。我々は磁化活性汚泥法の研究を展開する中で、汚泥の濃縮・脱水が磁気力で飛躍的に効率化できる可能性を示してきた。本発表では、永久磁石を用いた磁気力援用脱水プロセスによる磁化活性汚泥の脱水法を検討し、また脱水汚泥の利用法の一例として堆肥化を試みた結果を報告する。

国内の下水処理だけでも年間4億 m^3 の濃縮汚泥が発生するといわれる。水処理プロセスのほとんどは運転にともない大量の汚泥を発生し、ほぼ99%が水分である状態で排出されるため、これらの汚泥は多大なエネルギーを使って濃縮・脱水、焼却され廃棄されている。バイオマスニッポン総合戦略など国家的な課題として対策が検討されるなど、効果的な汚泥の濃縮・脱水法への大きなニーズが潜在すると考えられる。水環境の悪化が問題となりつつある新興国や発展途上国でも水の浄化が進むにつれて汚泥処理が深刻な課題となると予想される。我々は磁化活性汚泥法を研究する中で、簡単に汚泥に磁気シーディングできることを示してきた。微生物フロックだけでなく、凝集沈澱でもマグネタイトを添加するだけで磁気分離や濃縮が可能である。

磁気分離では、超電導バルク磁石を用いた汚泥の高速固液分離装置の開発例が報告されており、これらの装置は分離と同時に水切り程度の脱水もおこなうことができる。代表的な磁気分離水処理法であるフェライト法でも、磁気力を用いた汚泥の濃縮回収法が利用できることがメリットとして知られている¹⁾。我々の研究においても、磁気力を利用した汚泥濃縮は沈降分離より1000倍以上速く、永久磁石を用いれば非常に省エネルギーな高速分離が実現されることが示された。

磁気吸引力は汚泥にのみ作用し、水には作用しないため、従来の沈降分離や遠心分離はもとより、スクリーンプレスやベルトプレスなど圧搾脱水においても、原理的に有利な脱水操作が可能と考えた。磁石に汚泥を付着させて水中から引き上げるだけで、含水率を95~98%に低下させられるが、さらに、ろ布を押し当てることで脱水できると考えた。目の粗いろ布を使っても汚泥は磁気力で吸引されているため、水だけを吸い出すことが可能であった。

今回は基礎的な実験として、磁石に付着させた汚泥にペーパータオルを押し当てて磁石上で磁気力を作用させながら汚泥を圧搾する実験をおこない、磁気力援用脱水の可能性を検討し、また脱水性に影響を及ぼす因子について定量的な検討を試みた。さらに汚泥有効活用の一例として脱水後の汚泥の堆肥化についても検討した。

2. 実験

汚泥は下水処理場の活性汚泥をそのまま用いた。汚泥濃

度と同濃度になるようにマグネタイト(Fe_3O_4 、関東化学製)を添加し磁気シーディングをおこなった。磁気シーディング後に、汚泥は小型の磁石ドラムで濃縮・回収された。この汚泥をプラスチック磁石(100mm×100mm×2mm)に磁気力で貼り付け、ペーパータオルを押し当てて加圧することで脱水した。加圧条件は $0.05\sim 1\text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ とした。一定時間経過後、汚泥を採取し、含水率を赤外線水分計を用いて測定し、加圧条件、加圧時間と含水率の関係を調べた。

3. 結果と考察

市販の磁性粉を混合するだけで直ちに活性汚泥は磁気力援用脱水に用いることができた。磁気シーディングされた汚泥(磁化活性汚泥)は磁石ドラムによる濃縮操作で含水率約95%まで数秒で濃縮された。脱水された水は汚泥を含まない、沈降分離時の上澄みと同等の透明な液体が得られた。脱水実験では汚泥が磁気力で吸引されているため、加圧時に横から押し出されてくることもなく、磁気援用脱水の効果が確認できた。磁化活性汚泥は磁石上の数ミリの範囲に付着するため、磁石から遠くまで磁場を発生する必要はなく、本実験で用いたプラスチック磁石は多極着磁で、磁石近傍で効率よく磁気勾配を発生させ、十分な汚泥の吸引効果が得られた。超電導磁石を用いた場合もこのような配慮が必要であると考えられる。

含水率は脱水操作の初期に急激に低下し、時間経過とともに含水率低下が緩やかとなった。汚泥中の水分は微生物の外側の水と微生物が本来持っている水分があり、前者は急激に脱水できるものの、後者を取り除くことはこの方法では難しいためと考えられる。

本実験では $1\text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ の含水率は66%まで達成できた。本研究では永久磁石を用いているため磁気力発生のための電力コストは必要ない。従来の加圧脱水と比べて数分の1の圧力で十分な脱水効果が期待できる。

脱水された汚泥の堆肥化実験もおこなったところ、通常の活性汚泥の堆肥化と同様に自然発酵し、温度上昇も確かめられた。土壌中に鉄分は多量に含まれており、マグネタイトが砂鉄と同成分であることから土壌改良材として利用することは問題ないものと考えられる。

謝辞: 本研究は科学研究費基盤研究(A)18201011の支援を受けた。

参考文献

- 1) 酒井保藏, 電気学会超電導応用電力機器研究会 ASC-06-43 (2006)

医薬用たんぱく質の高勾配磁気分離システムによる 高速分離・精製・回収用フィルターの設計

Design on Filter of High Gradient Magnetic Separation System for trapping Immunoglobulin in Serum

我妻 洸, 淵野 修一郎, 古瀬 充穂(産総研); 植田 浩史, 石山 敦士(早大); 柁川 一弘(九大);
AGATSUMA Koh, FUCHINO Shuichiro, FURUSE Mitsuho (AIST);
UEDA Hiroshi, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University); KAJIKAWA Kazuhiro (Kyusyu University);
E-mail: hiroshi-ueda@waseda.jp

1. はじめに

我々は、医療用たんぱく質のうち特に血清中に微量存在する免疫グロブリンの分離・精製に超伝導マグネットを用いた高勾配磁気分離システムを応用する検討を行ってきた。既存技術では、磁気分離に永久磁石を用いているため、磁気力が弱く、分離できる磁気ビーズの大きさは約 $1.5 \mu\text{m}$ 程度以下には出来ない。ナノサイズの医用たんぱく質を効率良く分離するには、磁性ビーズをナノサイズにすることが囑望される。磁性ナノ微粒子を効率良く磁気分離出来れば、たんぱく質と特異的に結合する物質を磁性ナノ微粒子の表面に付けることにより、免疫グロブリンなどの医用たんぱく質の連続・高速の分離・精製が可能になる。我々は永久磁石の代わりに超伝導マグネットを用いることによりはたらく磁気力を強めて、磁性ナノ微粒子を高勾配磁気分離で効率よく分離・精製できることを実験で示した[1]。しかし、磁性ナノ微粒子を高速で高効率に回収するには、目詰まりを起こさないフィルターの開発が重要であることがわかった。今回、磁性ナノ微粒子の高速回収用フィルターの設計・検討を行ったので報告する。

2. 磁気力の計算

超伝導磁石を用いた高磁界・高勾配磁気分離装置により、磁気粒子が受ける磁気力 F_M は外部磁場が十分大きい場合、次式で表される。

$$F_M = V_p M_p \nabla H \quad (1)$$

ただし、 V_p : 磁気ビーズの体積、 M_p : 磁気粒子の飽和磁化、 H : 磁気ビーズが置かれている磁場の大きさである。

今回は SUS 丸細線(径 $20 \mu\text{m}$)の磁気飽和を考慮して、磁場をパラメータとして径 100 nm の磁気粒子 1 つにはたらく磁気力を計算した。SUS 丸細線の磁化曲線は Fig. 1 のように仮定し、材質としては SUS430 を想定し、飽和磁化 M_s は 1.6 T 、飽和前の比透磁率は 20 とした。また、磁気粒子の飽和磁化 M_p は 0.5 T とした。

Fig. 2 に磁性細線の配置を示す。今回は、(a) 1 本、(b) 3 本並んだもの、(c) 格子状にならべたもの、の 3 種類について計算を行った。

3. 計算結果

Fig. 3 に磁場と磁気力の関係を示す。磁性細線が磁気飽和した後は、磁場を増加させると細線周囲の磁気勾配が減少するため、磁気力が減少する。



Fig. 1. M - H and B - H curves of SUS wire

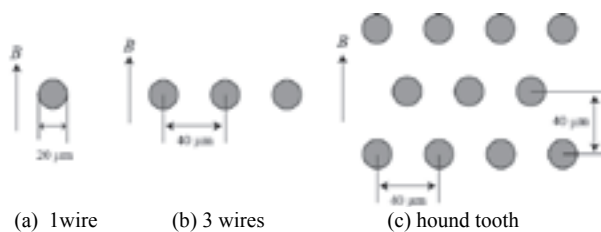


Fig. 2. Schematic drawing of numerical model of filter

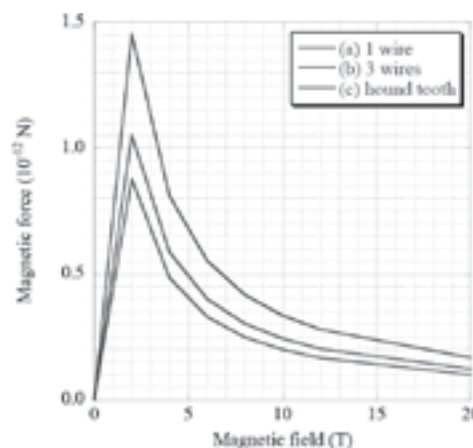


Fig. 3. Magnetic force vs. magnetic field.

細線の配置についてみてみると、横に 3 本並べた場合は、細線 1 本だけの場合よりも磁気力が小さくなる。これは、中心の細線に隣の細線の磁化による磁場が逆向きにかかるためである。しかし、格子状に配置すると、磁気力が増すことがわかる。したがって、細線間隔を適切に設定することで磁気力を向上させることができる。

4. 今後の予定

まず、フィルターを製作し、磁気分離の実験を行う。さらに、フィルターを構成する磁性細線の配置間隔などをパラメータとしてフィルター周囲の磁場、磁気力分布を解析によって求め、磁気粒子の挙動および磁気粒子の捕獲領域の形状を検討し、分離性能を評価する。

また、磁性細線に付着した磁性粒子を回収するためには、磁性細線を消磁する必要があると考えられる。今後は、磁気分離に利用しているマグネットを使って、磁性細線の消磁についても検討を行う。

参考文献

1. K. Agatsuma, et al, "Previous Test of High Gradient Magnetic Separation System for trapping Immunoglobulin in Serum", Abstracts of CSJ Conference, vol.77 (2007).
2. H. Ueda, et al, "Design Study on Filter of High Gradient Magnetic Separation System for Trapping Immunoglobulin in Serum", Abstracts of CSJ Conference, vol.77 (2007).

携帯型超電導バルク磁石システムの開発(2) - 10T着磁試験 -

Development of A Portable Superconducting Bulk Magnet System (2) -Magnetization Test in 10T-

佐保 典英、田中 弘之、西嶋 規世(日立)、佐々木 明(日立メディコ)

SAHO Norihide, TANAKA Hiroyuki, NISHIJIMA Noriyo (Hitachi), SASAKI Akira (HMC)

E-mail: norihide.saho.cc@hitachi.com

1. はじめに

小型軽量で着磁後超電導状態を維持したまま、容易に輸送できる携帯型超電導バルク磁石システムを前回試作した[1]。本磁石システムは、局所に強力な磁気力を発生できる特性を生かし、磁性物質の高速磁気分離、血管内のナノサイズ磁性薬剤の病巣への磁気誘導ドラッグデリバリーシステム(MDDS)[2][3]、高磁場応用の研究開発分野などへの需要が期待できる。本報告では、さらに軽量化した携帯型超電導バルク磁石システムの構成と印加磁界強度 10 T での着磁性能を報告する。

2. 携帯型超電導バルク磁石の構造

前回[1]の超電導バルク磁石では、印加磁界強度 6 T で所定の着磁性能を得るために Gd-Ba-Cu-O 高温バルク超電導体(外径 45 mm)の長さを6層の 90 mm としたが、今回、軽量化を図るため、印加磁界強度を 10 T に増加させることで、バルク超電導体の長さを1層の 15 mm で、さらに優れた着磁性能を得られる設計とした。ただし、着磁用超電導磁石の漏洩磁場から圧縮機一体型の小型ヘリウム冷凍機を保護するため、図1の概観写真に示すように、磁石本体サイズを 120 mm 長くし、全長は 760 mm である。磁石本体重量は、バルク超電導体数の低減、バルク超電導体と冷凍機を接続する熱伝導体材質を銅からアルミニウムに変更する等の改善により、前回より 1.0 kg 軽量化し 8.5kgとした。磁石先端部の真空容器直径は、79 mm である。

図2に試作した超電導バルク磁石をフィールドコイルで着磁する際の全体システム構成を示す。印加用超電導磁石の室温ボア直径は 100 mm である。

3. 実験結果及び考察

冷凍機による超電導バルク磁石のバルク冷却温度 39.1 K で、今回、液体窒素予冷を組み合わせたことによりクールダウン時間は3時間30分となり、前回の予冷無しの場合に比べ約3時間短縮できた。超電導バルク磁石本体の消費電力は 195 W(水道水冷却の場合)で、冷却水チラーユニットを含めた磁石システムの消費電力は 507 W(冷却水循環方式)である。

印加磁界強度 10 T において行った着磁実験の結果、真空容器表面での垂直方向(z軸方向)の最大磁束密度は 6.76 T で前回の着磁磁場密度 5.07Tを大幅に上回り、真空容器表面から 50 mm 離れた位置での磁気勾配は 9.65 T/m でほぼ前回と同等の値を得た。

本着磁条件における臨界電流値を、ビーンモデル法を用いて実験結果から求め、その値を用いて算出した3次元の磁気力係数 f_m (磁束密度×磁気勾配)ベクトル値の分布図を図3に示す。本図から、バルク超電導体の表面部($X=0$ mm で $Z=10.5$ mm 以内)に、1,000 T²/m 以上の f_m の領域が発生することが分る。真空容器表面の磁気勾配の解析値は、797 T/m であった。また、本超電導バルク磁石を用い、水中の直径約 1 mm の気泡の磁気吸引現象を確認した。

また、輸送簡素化を目的に、軽四輪トラックに市販のポータブル正弦波インバータ発電機(定格出力 900 VA)を車載して、着磁後磁石システムを冷却運転しながら約 200 km の輸送試験を実施し、問題なく運搬できることを実証した。

4. まとめ

本研究では、試作した携帯型超電導バルク磁石システムの 10T 着磁時における着磁特性を明らかにし、かつユーザ側で高価な着磁用超電導磁石を所有しない研究機関や病院でも、高磁場超電導バルク磁石をいつでも利用できる見通しを得た。

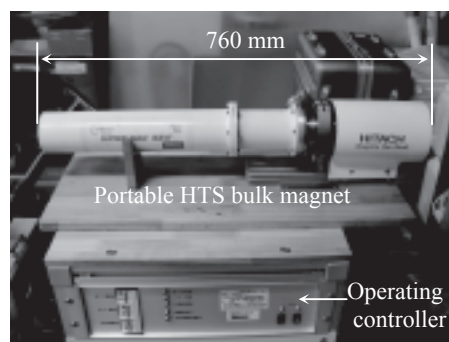


Fig. 1 Portable high Tc superconducting (HTS) bulk magnet

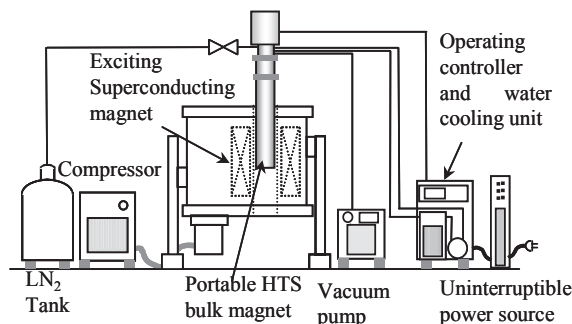
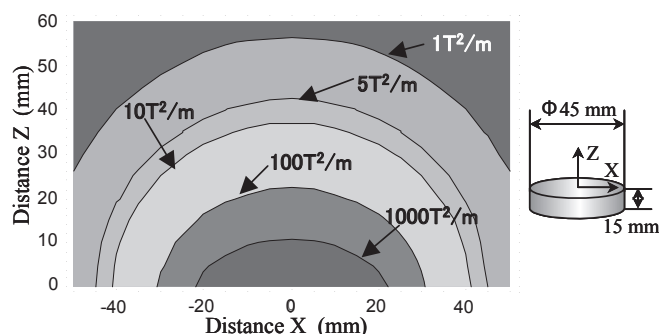


Fig. 2 Magnetization system of bulk superconductors of the portable HTS bulk magnet system.

Fig. 3 Magnetic force factor f_m on a surface of the bulk superconductors

参考文献

- [1] 佐保典英 他:第 77 回秋季低温工学・超電導学会 p. 31
- [2] 佐保典英 他:第 77 回秋季低温工学・超電導学会 p. 32
- [3] 西嶋茂宏 他:第 77 回秋季低温工学・超電導学会 p. 29

超伝導バルク磁石を用いた永久磁石の着磁 Magnetizing a Permanent Magnet using HTS Bulk Magnet

今井 順、広瀬 豊、猪股 正、小川 純、福井 聡、佐藤 孝雄、岡 徹雄(新潟大学); 山口 貢(超電導機構)
 IMAI Jun, HIROSE Yutaka, INOMATA Tadashi, OGAWA Jun, HUKUI Satoshi, SATO Takao, OKA Tetsuo (Niigata University);
 YAMAGUCHI Mitsugi (Japanese Super-conductivity Organization CO.Ltd)
 E-mail: f08e053a@mail.cc.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

永久磁石の着磁技術は現在電磁石のパルス磁場中に試料を曝す方法が主流であるが、今回超伝導バルク磁石を用いて永久磁石の着磁を行った。鉄ヨークを用いた磁気回路による電磁石のパルス磁場は 2T 程度であるのに対し、Nd-Fe-B 系の永久磁石は材料性能まで着磁するのに印加磁界が 2.5T 以上必要となる。バルク磁石は 3T を超える磁場を発生することから、永久磁石の着磁にバルク磁石を用いれば完全な着磁が可能である。

2. 実験方法

バルク磁石を用いて永久磁石の着磁を行った。バルク磁石は 3T を超える強磁場を発生することから、永久磁石とバルク磁石が吸着しないように、着磁固定治具を用いる。Fig.1 に示すのが着磁装置であるバルク磁石の装置と固定治具を用いた永久磁石の着磁実験の様子である。治具はハンドルによって上下、左右に動く仕組みとなっており、その中心に試料が固定されている。着磁試料は寸法 $50 \times 75 \times 5 \text{mm}^3$ の TDK 製 NEOREC (Nd-Fe-B 系) である。この試料の上端からそれぞれ①12.25mm、②25mm、③37.25mm の位置で試料を水平に移動させ、バルク磁石の磁場中に試料を曝すことで着磁を施した。試料の走査した回数によって着磁状況の違いを比較するために、②の位置を 1 回だけ走査したもの(1 回スキャン)、①と③の位置を往復するように 2 回走査したもの(2 回スキャン)、①、②、③の位置を蛇行するように 3 回走査し、着磁したもの(3 回スキャン)を用意した。この試料の着磁面に関して磁場測定を行い、着磁状況を比較する。また、1 回スキャンの試料に関しては着磁した面の反対の磁場分布も測定し、比較する。

3. 実験結果と考察

着磁状況を比較するための基準として、超伝導マグネットの 5T 静磁場中で着磁をした永久磁石の磁場分布を用いる。均質な静磁場中で着磁を行ったものは着磁状況も理想的であると考えられるからである。その比較図を Fig.2 に示す。これらの着磁状況を比較すると、二回スキャン、三回スキャンの磁場分布は理想系に近い形になっていると言える。一方、一回スキャンの試料に関しては理想系の磁場分布と形が違って見えるが、これは一回だけの走査であるためバルク磁石の磁場が試料全体にいきわたらず、バルク磁石が通った部分だけが磁化され、このような磁場分布になったものと考えられる。また、一回スキャンの裏面の磁場分布の比較も Fig.3 に示すが、着磁面に比べて磁場が小さくなっていることが分かる。これは、着磁面に対して裏面ではバルク磁石から遠いことで裏面を貫く磁束が着磁面より小さいことから、完全に着磁するには磁場が足りなかったからであると考えられる。

このことから、バルク磁石を用いた着磁で永久磁石を着磁することが有効であることが確認できた。また、5mm の薄さであるが着磁反対面を貫く磁場が着磁面より減少することで着磁の状況が異なり、印加磁場がより大きくなれば両面で同じような磁場分布が得られるものと考えられる。

Bulk with GM Refrigerator Permanent Magnet with Magnetizing Fixer

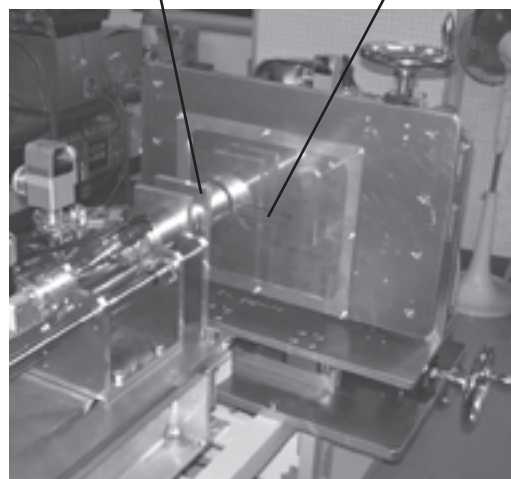


Fig.1 Experimental setup

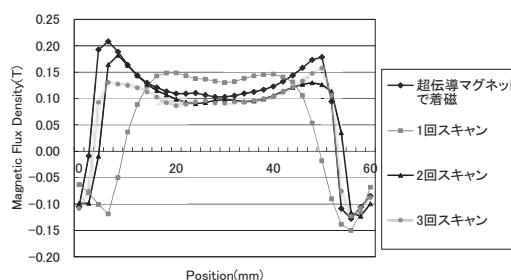


Fig2. Magnetic field distribution on the front face of the permanent magnet

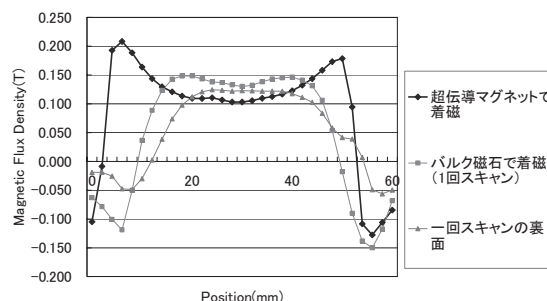


Fig3. Magnetic field distribution on the back face of the permanent magnet

参考文献

水谷 宇一郎: 超伝導永久磁石を用いた強磁場発生システムの研究開発 ISTEJ ジャーナル Vol.3 13 No.3 2000 p.26~p. 28

磁気浮上型超電導免震システムの荷重分布に対する水平振動特性

Influence of Load Weight Distribution on Horizontal Vibration Characteristic in Magnetic Levitation Type Superconducting Seismic Isolation Device

玉城 佳祐, 川崎 健志, 谷貝 剛, 津田 理, 濱島 高太郎 (東北大学); 山田 高之, 安井 健治 (奥村組)
 TAMASHIRO Keisuke, KAWASAKI Takeshi, YAGAI Tsuyoshi, TSUDA Osamu, HAMAJIMA Takataro (Tohoku University);
 YAMADA Takayuki, YASUI Kenji (Okumura Corporation)
 E-mail: tamasiro@ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

高温超電導体 (HTS) と永久磁石を組み合わせることで、無制御での安定浮上が可能となる。我々はこの現象に着目して、磁気浮上型超電導免震システムを考案し、理論的には水平方向の振動を完全に除去できることを確認した [1]。しかし、これまでの考察は建造物の荷重密度が一樣である場合のみであるが、建築物の荷重密度は必ずしも一樣ではない。本システムにこのような不均一な荷重 (偏荷重) が印加されると、免震装置が傾き、免震効果が得られなくなる恐れがある。本研究では、免震装置に偏荷重が印加された場合の浮上特性を測定し、水平浮上を実現する条件や、偏荷重に対して水平浮上を実現している場合の免震効果について検討した。

2. 実験方法・結果

1. 水平浮上試験

今回の浮上システムの概略図を Fig.1 に示す。本浮上システムは、第一層に 3mm×3mm×9mm の Nd-Fe-B 永久磁石 (表面磁束密度 360mT) を、長手方向に同極が、幅方向に異極が交互になるように配置し、第二層には直径 30mm、厚さ 10mm の QMG-YBCO バルク体を配置した。高さを調節できるスペーサを介してバルク体を着磁した。実験は、バルク体 1 と負荷 M を設置する場合と、バルク体 1, 2 及び負荷 M, m (M > m, 負荷 m は 1g) を設置する場合の二通りの方法を考え、スペーサが 2mm と 4mm の時の水平浮上特性を測定した。このとき、負荷印加による第二層の傾きを、両端部の上方に設置した二つのレーザー変位計によって測定し、水平時に対する傾斜角で水平浮上特性を評価した。その結果、バルク体が二つの場合で、初期ギャップが 2mm の場合に傾斜角を小さく抑えられることを確認した。

偏荷重時に水平浮上を達成させる方法として、バルク体を傾斜させた状態で着磁する方法を考えた。これは第二層に傾斜をつけたまま着磁することで、偏荷重によって発生するモーメントをバルクに働く復元力 (の差) により補完することで、第二層の水平状態を作り出す方法である。その時の初期傾斜角 (オフセット角) と傾斜角の関係を、上記の二通りの方法において測定した。実験結果の一例として Fig.2 にバルク体が二つの場合の結果を示す。バルク体が二つの場合は、ギャップや荷重に因らず、ほぼ全ての条件で傾斜角を 0.5° 以内にする事ができ、水平浮上が可能であることを確認した。一方、バルク体一つの場合は、水平浮上点は存在したものの完全な水平浮上は困難であることがわかった。

2. 振動試験

上記の結果から、偏荷重時でも水平浮上が可能であることが明らかとなったため、次に免震装置に印加される荷重分布がレール幅方向の振動特性に及ぼす影響について検討した。第一層を加振台に取り付け、Fig.1 の左右方向におよそ 5Hz まで周波数を変化させ、レーザー変位計によって第一層と第二層の相対変位を、均一荷重時 (負荷を全て第二層の中心部に加えた場合) と偏荷重時 (バルク体が 2 つ、負荷 M が 600g、初期傾斜角 -1.3° の傾斜角 0° の場合 (Fig.2 の P 点) とで測定を行い比較した。結果を Fig.3 に示す。偏荷重時の変位は均一荷重時と殆ど等しいことが確認された。これより、本免震シ

ステムでは、荷重分布が振動伝達に悪影響を及ぼすことなく、均一荷重時と同等の免震効果が得られることがわかった。

参考文献

1. M. Tsuda, et al.: Abstracts of IEE Japan Meeting, ASC-07-22, (2007) p.21-26

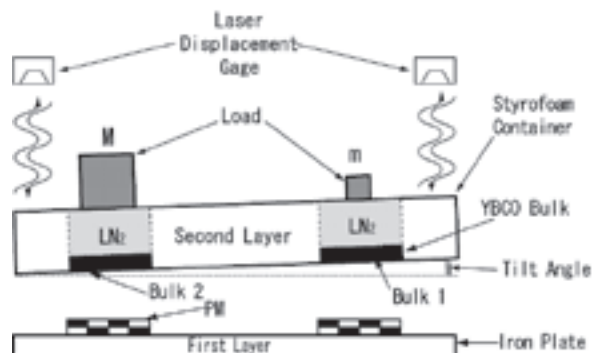


Fig.1 Schematic drawing of experimental setup for magnetic stiffness in the pitch direction of an YBCO bulk and PM system.

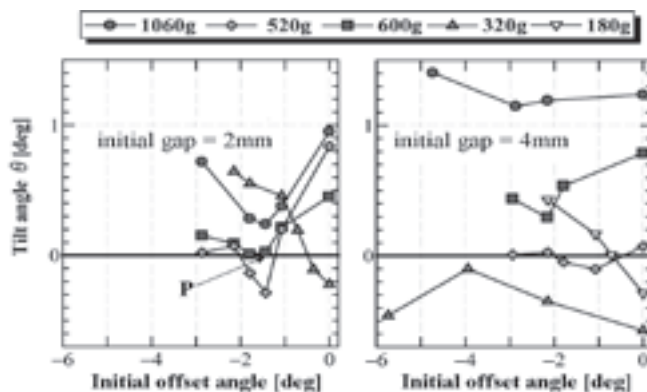


Fig.2 Experimental results of tilt angle for horizontal levitation as a function of initial offset angle in two-bulk system.

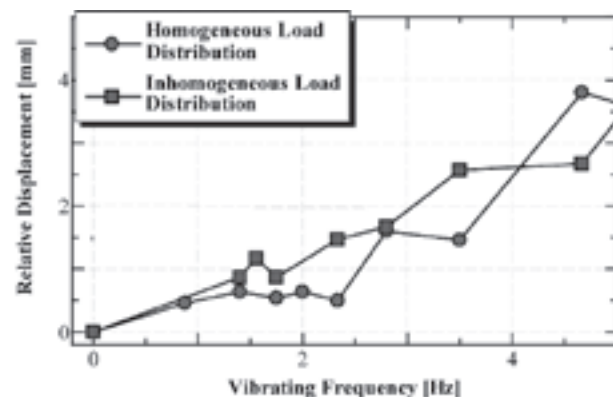


Fig.3 Experimental results of relative displacement between YBCO bulks and permanent magnets as a function of vibration frequency in two-bulk system.

MgB₂ の臨界電流特性に関する理解の現状 - 調査研究会成果報告(2)-

Current Understandings in Relation to Critical Current Properties of MgB₂ - Report from Research Group of CAJ(2)-

下山淳一 (東大院工)、熊倉浩明 (物材機構)

SHIMOYAMA Jun-ichi (Univ. of Tokyo), KUMAKURA Hiroaki (NIMS)

E-mail: shimo@sogo.t.u-tokyo.ac.jp (J. Shimoyama)

【はじめに】本発表では低温工学協会に2005-2007年度に設けられた「MgB₂における臨界電流特性に関する調査研究会」の成果報告を行う。40 K級の高い T_c を持ち、単純な2元化合物で合成が容易、さらに化学的にも比較的安定であるMgB₂の材料化研究は2001年の発見直後より活発であり、本調査研究会の期間にも様々な新しい展開があった。本会の趣旨はMgB₂線材の臨界電流特性を実用レベルに引き上げることを主眼とした調査活動であり、3年間で計8回研究会を開催した。研究会は全て自由参加形式で行い、10以上の研究機関からの発表、議論などに協力いただいた。本研究会の前半4回分までの概要とその時点で得られていたMgB₂の臨界電流特性に関する理解については、2006年秋季低温工学・超電導学会で報告しているの、以下には後半の研究会活動の報告としてMgB₂の材料開発動向と臨界電流特性の決定因子についての理解の現状、および今後の展開を述べる。なお、第5回以後の研究会の概要は以下のとおりである。

第5回 平成18年11月22日 講師 岡田道哉(日立)
題目「MgB₂線材の実用化展望」、講師 波多 聡(九大)

題目「透過電顕で観察したMgB₂微細組織の特徴(2)」

第6回 平成19年5月18日 講師 松下照男(九工大)、
山本明保(東大) 題目「MgB₂多結晶体のconnectivityと
臨界電流特性」

第7回 平成19年11月21日 動向紹介 主査

題目「海外におけるMgB₂材料開発・応用の動向」

第8回 平成20年3月26日 動向紹介 松本明善(NIMS)、
花房慶(東大) 題目「調査研究会3年間の活動の総括と最新
の動向」

【MgB₂線材の臨界電流特性と応用】MgB₂線材の作製方法は依然としてPowder-In-Tube法が主流であり、Fe、Fe/Cu、Niなどがシース材に用いられている。MgとBの混合粉末を金属管に充填し加工後、熱処理によってMgB₂相を生成するin-situ法は、既製のMgB₂粉末を充填するex-situ法よりも、臨界電流特性に優れることから、高特性線材開発研究の主流になっているが、海外の2社より市販されている線材ではex-situ法が採用されている。このためもあり、市販線材の臨界電流特性は2004年頃よりほとんど改善していない。しかし、長尺化や多芯化が進み、2006年の秋には20 K動作0.5 TクラスのMRI装置が開発、展示された。日立でも液体ヘリウム冷却ではあるが1.5 Tの永久電流回路試験に成功しているなど、MgB₂線材が永久電流運転機器への応用に適することがはっきりした。ex-situ法が市販線

材の主流であるのは低製造コストと多芯化の容易さのためと思われるが、Nb-Ti線材よりも低価格になれば、従来のNb-Ti超伝導磁石の外層部分(線材長さはこの部分が大半)にMgB₂線材が置き換わる可能性があることも指摘された。一方、高磁界特性改善のためのC置換は、多様なC原料が試されるようになり、従来のSiCやB₄Cのほか、有機物が併用されるようになり、4.2 K、10 Tでの J_c は、 $3 \times 10^4 \text{Acm}^{-2}$ を超えている。線材開発の新しい動きはMg芯を用いた拡散法であり、Mg芯が線引き加工によって均一に伸ばせたことがブレークスルーである。すでに、4.2K、8Tで 10^5Acm^{-2} 以上の J_c が得られており、今後、特に低～中磁界での一層の J_c の改善が期待できそうである。

【多結晶MgB₂の構成・組織と臨界電流特性】MgB₂多結晶における有効電流経路の低い割合が最近の大きな話題の一つであり、これに対して九工大-東大の共同研究によって、普遍的な解析手法が確立された。これによれば、通常作製されるin-situ法では10%程度しか有効な電流経路がなく、粒間に広がる酸化層の除去や高密度化によって無配向多結晶線材においても約10倍 J_c 改善の余地があることが明らかになった。また、TEMによる組織観察からは、酸化物の分布と臨界電流特性との関係が定性的に理解されはじめている。特にc軸配向薄膜ではc軸に平行に発達した粒界における酸素の分布が見えており、微量酸素ドープによる磁界下での記録的な高 J_c の起源がわかりつつある。また、MgB₂バルクとして最高の J_c を示す長時間熱処理した拡散法高密度バルクでは、従来結晶表面を覆っていた酸化物が粒状になっていることも明らかにされた。

【まとめと今後の展開】本調査研究を通じてMgB₂の臨界電流特性改善指針および、線材においては大きな改善の余地があることが明らかになった。結晶粒の微細化、高密度化、酸化物分布の制御および適切な方法によるC置換が有効な戦略であり、これらをいかに線材で実現するかが今後の課題になる。そこで平成20~22年度には「MgB₂の材料特性向上に関する調査研究会」を新たに設け、主に線材について、臨界電流特性改善のための具体的な手法の検討を行う。なお、編集委員会の協力のもと低温工学誌8月号では「MgB₂超伝導体の臨界電流特性および材料化の展望」と題した特集号を組み、MgB₂材料特性に関する理解の現状をより詳細に報告する予定である。

エチルトルエン及び SiC 粉末を同時添加した in situ PIT 法 MgB₂ テープの超電導特性(第三報) — J_c 向上の要因及び添加量変化による影響 —

Superconducting properties of in situ powder-in-tube-processed MgB₂ tapes with both ethyltoluene and SiC powder added (Third report)

- The factors of J_c improvement and the influence by change of the amount of addition -

山田 秀之(筑波大、JR東海), 五十嵐 基仁 (JR東海);

熊倉 浩明(物材機構、筑波大), 北口 仁, 松本 明善(物材機構)

Hideyuki Yamada (Tsukuba Univ., Central Japan Railway Co.), Motohiro Igarashi (Central Japan Railway Co.);

Hiroaki Kumakura (NIMS, Tsukuba Univ.), Hito shi Kitaguchi, Akiyoshi Matsumoto (NIMS)

E-mail:h.yamada@jr-central.co.jp

1. はじめに

今回は、エチルトルエンと SiC 粉末を同時添加する方法を長尺線作製に適用する場合、熱処理によって発生する水素ガス及び残留しているエチルトルエンの蒸発したガスにより、シースのふくれもしくは破裂が発生することが考えられるため、伸線加工前に熱処理をすることにより、水素ガス等を事前に排出した線材を作製し、事前熱処理をしない場合とほぼ同じ J_c が得られたことを報告した。

今回は、第三報として、この方法で作製した in situ PIT 法 MgB₂ 線材について、作製した MgB₂ コアの密度測定を行い、無添加もしくは SiC 添加線材よりも高い密度を有していることがわかり、高密度が J_c 向上の要因の1つと考えられるため、報告する。また、エチルトルエン及び SiC 粉末の各添加量を変化させた場合の J_c への影響を確認したので報告する。

2. 実験方法

MgB₂ 線材は市販の MgH₂ 粉末及び市販のアモルファス B 粉末、5~20mol%エチルトルエン、5~10mol%SiC 粉末の混合粉末を使用して作製した。添加したエチルトルエンが蒸発しないように、ボールミルを用いて1時間の粉末混合を行った。作製した混合粉末を外径6mm、内径3.5mmの純鉄管に充填した後、溝ロール加工と平ロール加工を用いて幅4mm、厚さ0.5mmのテープに伸線加工した。なお、粉末の混合と混合粉末の鉄管への充填は、粉末の酸化を避けるため、グローブボックスを用いて、高純度アルゴンガス雰囲気下で実施した。伸線加工後の熱処理は、アルゴンガスを流して600℃で1時間実施した。

密度測定は、線材から取り出したコアについて、断面積を光学顕微鏡で、長さをノギスで、重量をデジタルはかりで測定した。臨界電流 J_c は、通常の4端子抵抗法により12T以下の磁界中で測定した。磁場はテープの面に平行に印加した。J_c は1μV/cmの電圧が発生する電流と定義した。

3. 結果

Table に測定したコアの体積、重量、密度、充填率を示す。なお、MgB₂ の比重は 2.63g/cm³ で、充填率は密度をこの値で割ったものである。

無添加もしくは SiC 添加線材の充填率は、40~50%であるため、エチルトルエンを添加することにより、充填率が70%以上と、密度が高くなっていることがわかる。よって、エチルトルエン添加による J_c 向上の要因の1つとして、コアの密度が高くなっていることが考えられる。

次に、Fig. にエチルトルエン及び SiC 粉末の各添加量を変化させた場合の同時添加線材の4.2Kでの臨界電流密度 J_c の磁場依存性の測定結果を示す。比較として、無添加、10mol%エチルトルエン添加、10mol%SiC 粉末添加の線材の測定結果も示す。

添加量を変化させた結果はすべて10mol%エチルトルエン+10mol%SiC 粉末添加線材より低い結果になった。特に、20mol%エチルトルエン+10mol%SiC 粉末添加線材の J_c は低かった。これは、エチルトルエンを20mol%添加すると、粉末が粘土状になり、十分にボールミルされないためと考えられる。

	MgH ₂ +B+Ethyltoluene10%	MgH ₂ +B+Ethyltoluene10%+SiC10%	
Volume	cm ³	0.0157	0.0124
Weight	g	0.0301	0.0241
Density	g/cm ³	1.921	1.940
Filling rate	%	73.0	73.8

Table The density and filling rate of MgB₂ core.

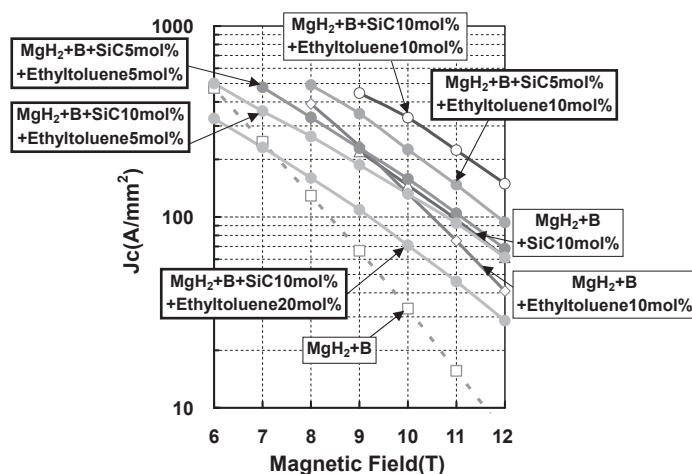


Fig. J_c-B curves at 4.2K of MgB₂/Fe tapes.

MgB₂ 線材の微細組織に及ぼす炭素系物質添加の影響Influence of doping with carbon compounds on microstructure in MgB₂ tape

波多 聡, 杠 直哉, ハリニ ソシアティ(九大); 山田 秀之, 五十嵐 基仁(JR東海); 松本 明善, 北口 仁, 熊倉 浩明(NIMS)
 HATA Satoshi, YUZURIHA Naoya, SOSIATI Harini (Kyushu University); YAMADA Hideyuki, IGARASHI Motohiro (JR Tokai);
 MATSUMOTO Akiyoshi, KITAGUCHI Hitoshi, KUMAKURA Hiroaki (NIMS)
 E-mail: hata@mm.kyushu-u.ac.jp

1. 緒言

MgB₂ の B サイトへの C 置換が臨界磁場及び強磁場中での J_c を向上させることが見出され、種々の炭素系物質の添加が試みられている。しかし、 J_c 特性は炭素系物質の種類や量などに強く依存し、そのメカニズムはよくわかっていない。講演者らは、これまでに SiC ナノ粒子を添加した MgB₂ 線材の微細組織を詳しく解析している。SiC を添加すると、C の B サイトへの置換に加えて、MgB₂ 結晶粒の微細化や Mg₂Si ナノ粒子の生成等による磁束のピン止め点の増大が起こり、それらの複合的效果により磁場中での J_c が大きく上昇するものと考えられる。本研究では、SiC と並んで注目されている芳香族炭化水素を添加した MgB₂ 線材の微細組織を観察し、 J_c 特性に及ぼす炭素系物質種の影響を調べた。

2. 実験方法

モル比 1:2 の割合で秤量した MgH₂ 粉末と非晶質 B 粉末に、生成 MgB₂ 量に対して 20mol% の C₄H₄S (チオフェン) または 10mol% の C₆H₆ (ベンゼン) を加え、ボールミルで混合した。この混合粉末を管径 6mm、長さ 50mm の Fe 管に充填し、冷間圧延した後、600°C で 1 時間の熱処理を行い、MgB₂ 線材を得た。作製した試料について、 J_c 測定、X 線回折、SEM 及び TEM による組織観察を行った。

3. 結果及び考察

10T における J_c は、C₄H₄S 添加線材で 1.5×10^4 A/cm²、C₆H₆ 添加線材で 1.2×10^4 A/cm² と、いずれも無添加 MgB₂ 線材の約 4 倍の値を示した。これらは SiC 添加線材に匹敵する J_c 値であり、10T 未満ではむしろ SiC 添加線材よりも高い J_c 値を示す傾向にあった。

C₄H₄S や C₆H₆ を添加した際の C の B サイト置換量は、X 線回折実験から 1~1.5% と見積られ[1]、SiC 添加線材での C 置換量(約 2%) に比べて少なかった。SiC 添加線材では MgO、Mg₂Si、MgB₄ の生成が認められたのに対して、C₄H₄S 及び C₆H₆ 添加線材では、MgO 以外に不純物相の生成は見られなかった。

Fig.1 は各 MgB₂ 線材断面の SEM 二次電子像である。無添加(Non-doped)線材や SiC 添加線材と比べて、C₄H₄S 及び C₆H₆ 添加線材の組織は空隙が少なく緻密である点に特徴がある。同様の結果が線材の密度測定からも得られており、MgB₂ 線材開発の課題である低充填率を向上させる上で芳香族炭化水素の添加はきわめて有効であることが判明した。

Fig.2 は TEM 暗視野法による微細組織観察の一例である。明るい領域は主相の MgB₂ 及び不純物相の MgO や Mg₂Si ナノ粒子(SiC 添加線材)の一部に対応している。無添加線材の結晶粒径は 10~200nm であり、SiC を添加すると結晶粒が微細化していることがわかる。一方、C₄H₄S 及び C₆H₆ 添加線材では、200nm を超える板状または棒状の MgB₂ 結晶が増加しており、結晶粒径に関しては SiC 添加の場合とは逆の傾向を示している。また、X線回折のところでも述べたように、C₄H₄S 及び C₆H₆ 添加線材では、添加物の有無に関係なく生成する MgO ナノ粒子以外に、顕著な微細不純物の生成は認められなかった。

以上の組織観察結果から明らかなように、C₄H₄S や C₆H₆ を添加しても、MgB₂ 結晶粒界や微細な常伝導介在物といった磁束ピン止め点の導入効果は期待できない。したがって、芳

香族炭化水素添加による J_c 向上は、C→B 置換効果に加えて、組織の緻密化と結晶粒粗大化に伴う MgB₂ 結晶粒の結合性向上により超伝導体内の電流経路が多く確保されたこと、によるものと考えられる。この添加物効果は、前述の SiC の場合とは明らかに異なるものである。すなわち、炭素系物質種によって J_c 特性向上のメカニズムは大きく異なる可能性があることが、本研究で明らかとなった。

本研究の組織観察の一部は、文部科学省九州地区ナノテクノロジー拠点ネットワーク(九州大学超高压電子顕微鏡室)の支援の下で実施されました。

参考文献

1. S. Lee et al.: Physica C, Vol. 412-414 (2004) p. 31.

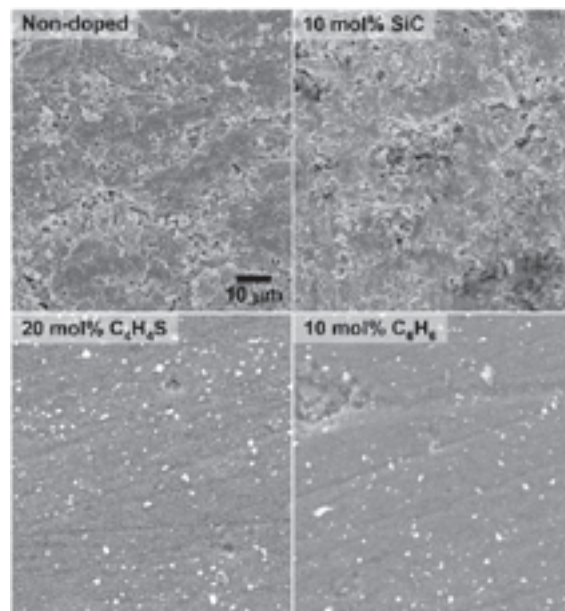


Fig. 1. Cross-sectional SEM images of MgB₂ tapes.

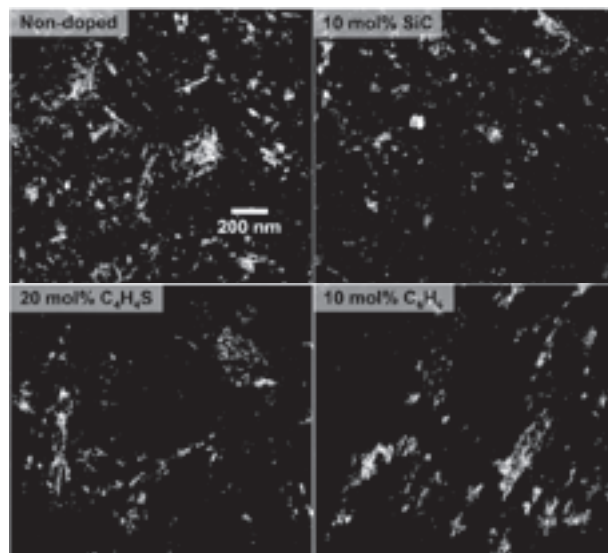


Fig. 2. TEM dark-field images of MgB₂ tapes.

MgB₂ 多結晶体における X 線ラインプロファイルの解釈 Interpretation of X-ray line profile of polycrystalline MgB₂

花房 慶, 萩野 拓, 堀井 滋, 下山 淳一, 岸尾 光二 (東大)

HANAFUSA Kei, OGINO Hiraku, HORII Shigeru, SHIMOYAMA Jun-ichi, KISHIO Kohji (University of Tokyo);

E-mail: tt076699@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp (K. Hanafusa)

1. はじめに

MgB₂ 超伝導体は 40K 級の T_c を有し、15~20 K で 4~5 T あるいは 4.2 K、高磁場で動作する超伝導マグネットへの応用が期待されている。その応用に向けては磁場下での臨界電流特性の改善などが課題であり、ピンニング力の強化が様々な方法で図られている。MgB₂ 多結晶体における主たるピンニングサイトは結晶粒界であることは既に分かってはいる。また、(110)面の X 線回折ピーク半値幅が不可逆磁場と相関を持つことも分かっており [1]、他のグループでも特性改善の指標として標準的に用いられるようになってきている。しかし、粒径とピンニング力の関係は定量的な理解に至っておらず、結晶粒内のサブドメイン境界の役割も明らかになっていない。

古くから X 線回折ピークの半値幅から粒径を定量的に評価する手段として、Scherrer の方法などが用いられているが、最近では X 線のラインプロファイルから結晶粒径分布を求める方法が発達してきている。そこで本研究では、X 線のラインプロファイルの解釈から結晶粒径の情報を得て MgB₂ バルクや線材の臨界電流特性や電子顕微鏡で観察される微細組織との対応を明らかにすることを旨とした。

2. 実験方法

Mg、B の粉末を Mg : B = 1 : 2 の割合になるように秤量し、乳鉢で乾式混合したものを原料粉末とし、Nb 管 (3 mm/2.6 mm) に充填した後、一軸プレスによってテープ状に加工した。これの両端をプレスにより封じ、石英管に真空封入後、600° で 6 時間の熱処理を行い、急冷した。Nb シースを剥いて得られた MgB₂ バルク試料について、粉末 X 線回折により構成相の同定および、結晶性、結晶粒径の解析を行った。また、SQUID 磁束計により、 T_c 、 J_c を評価し、SEM により微細組織観察を行った。

3. 結果と考察

得られた試料の XRD パターンからは、MgB₂ が主相であり、原料粉末由来の MgO を少量含んでいることがわかった。磁化測定で調べた T_c (onset) は 37K で、磁化ヒステリシスの幅から拡張 Bean モデルで求めた臨界電流密度は、20 K、自己磁場で $2.2 \times 10^5 \text{ A cm}^{-2}$ 、5 T で $\sim 200 \text{ A cm}^{-2}$ であった。

試料の X 線回折パターンの解析結果を以下に示す。定量的な解析を行う際は、装置に由来する収差が問題となるが、MgB₂ の場合、Stokes の方法による収差の除去は難しいと考えられる。そこで Ida らの方法 [2] を用いて主要な装置関数収差の除去を行った。MgB₂ の回折ピーク近傍のデータに対して擬 Voigt 関数を用いてカーブフィッティングを行った。ただし、誤差の重み付けとしては測定強度の平方根を用いた。そして、最適化されたパラメータから積分幅とその標準偏差を求めた。

Fig.1. に積分幅から求めた Williamson-Hall plot を示す。実線は、(hk0) ピークから求めた修正 Williamson-Hall plot [3] である。結晶子の形状として球形を仮定すると、体積加重平均粒径 (D_V : volume-weighted mean diameter) は約 90 nm と見積もられた。また、修正 Warren-Averbach 法 [3] に基づいて、面積加

重平均粒径 (D_A : area-weighted mean diameter) を求めた場合には、約 20 nm という値が得られた。対数正規分布を仮定した場合の MgB₂ の結晶粒径分布を Fig.2 に示す。これより、非常に小さい粒径領域に多くの結晶子が存在することが分かる。しかしながら、体積加重平均粒径と面積加重平均粒径の間に大きな差があることから、結晶粒径がかなり広い分布を持つことが示唆された。講演では、低温焼成した線材試料の解析結果も併せて議論する。

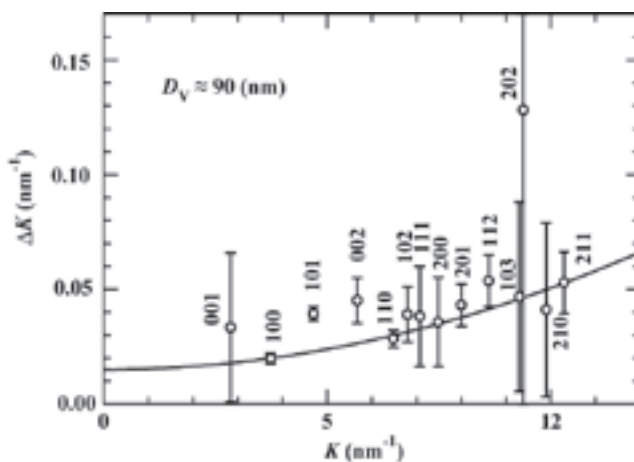


Fig. 1. Williamson-Hall plot of MgB₂ bulk. Solid line shows modified Williamson-Hall plot [3] estimated from (hk0) peaks.

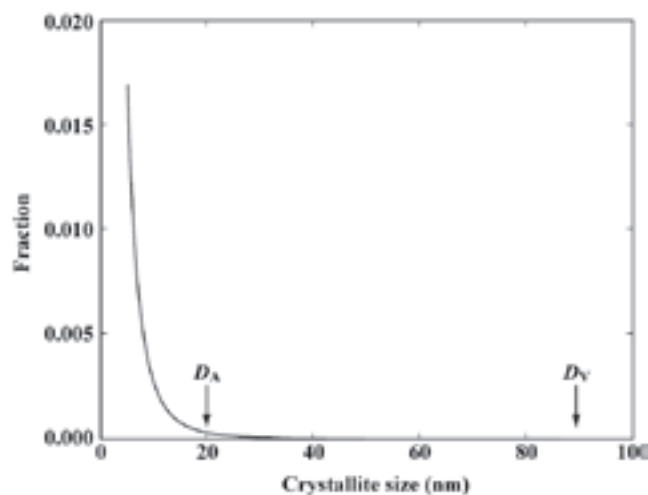


Fig. 2. Crystallite size distribution of MgB₂ bulk estimated from (hk0) peaks. The log-normal distribution of crystallite size is assumed.

参考文献

- [1] A Yamamoto *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **86** (2005) 212502.
- [2] T Ida and H Toraya, *J. Appl. Cryst.* **35** (2002) 58.
- [3] T Ungar *et al.*, *J. Appl. Cryst.* **34** (2001) 298.

SiC 添加ホットプレス MgB₂ テープ線材における磁束ピンニングの磁場・温度依存性

Magnetic-field and temperature dependencies of flux pinning for SiC doped MgB₂ tape wire with hot pressing

桑嶋英行, 七戸希, 金錫範, 村瀬暁 (岡山大学)
 山田豊, 新田晃央, 太刀川恭治 (東海大学)
 西島元, 渡辺和雄 (東北大)

H. Kuwashima, N. Nanato, S.B. Kim, S. Murase (Okayama University)
 Y. Yamada, A. Nitta, K. Tachikawa (Tokai University)
 G. Nishijima, K. Watanabe (Tohoku University)
 E-mail: hide-kw@power.elec.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

線材作製過程におけるホットプレス処理は, MgB₂ 結晶粒の結合性を高め, J_c 特性の向上に有効であることが報告されている^[1]. 本研究ではホットプレス法により作製された SiC 添加 MgB₂ 線材を用いて, ホットプレス処理がピンニング特性におよぼす影響を詳しく調べるために, 磁場強度・方向性および温度可変で臨界電流密度を測定し磁束ピンニング特性の評価を行った.

2. 実験

測定に用いた試料は in-situ PIT 法で作製された炭素鋼 (S20C) シースのテープ線材で, 熱処理時に加圧するホットプレス処理が施されている. 諸元を Table 1 に示す. 東北大学強磁場センターにて, 冷凍機, 超電導マグネットを用いて磁場強度・印加方向および温度を変化させ, 4端子法により臨界電流密度を測定した. なお磁場印加方向については, テープ線材の幅広面に対し垂直方向および平行方向として測定を行った.

Table 1 Specification of specimens

superconducting Material	MgB ₂
Process	in-situ method hot press
Sheath material	S20C
Added materials	SiC
Dimension (mm ²)	3.1×0.4
Length (mm)	30
MgB ₂ core (mm ²)	0.122
Sheath / Core ratio	10.2

3. 結果および考察

Fig.1 に垂直磁場下での臨界電流密度の磁場強度・温度依存性を示す. 熱処理のみの線材と比較すると, 特に低磁場域での J_c の向上が顕著で, これはホットプレス処理により結晶粒の結合性が向上したことによると考えられる^[1].

Fig.2 に垂直磁場下, 平行磁場下でのピン力密度のスケールリング則を示す. 実線は結晶粒界がピンとして働いた場合の理論曲線である. 垂直磁場下, 平行磁場下ともに, 温度が低くなるとピンニング曲線のピーク位置が低磁場側にシフトしていることがわかる. 特に垂直磁場下では, その傾向が顕著に現れており, 結晶粒界がピン止め点になった場合の理論曲線から大きく外れていることがわかる.

また以前の報告では, 熱処理のみ SiC 添加線材においては磁束ピンニング特性が磁場印加方向に対して等方性を示していた^[2]. しかし今回ホットプレス線材では, ピンニング特性が異方性を示しており, ホットプレス処理によりピン止め点の形状に何らかの変化が起こったことが原因として考えられる.

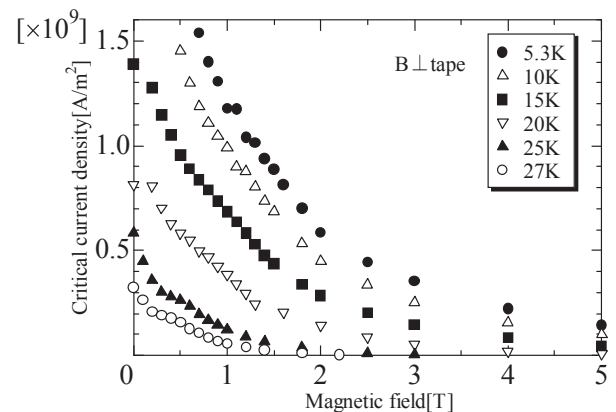


Fig.1 Temperature and magnetic-field dependence of J_c for SiC doped MgB₂/S20C tape with hot pressing.

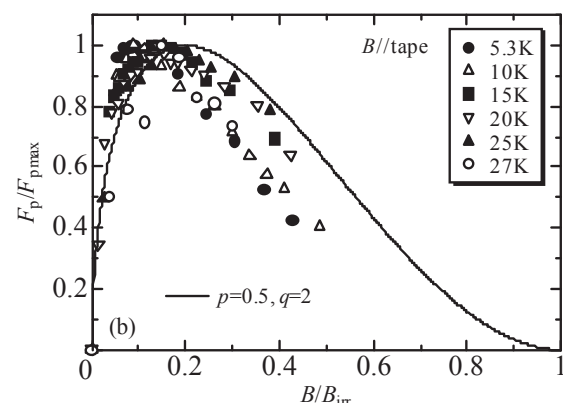
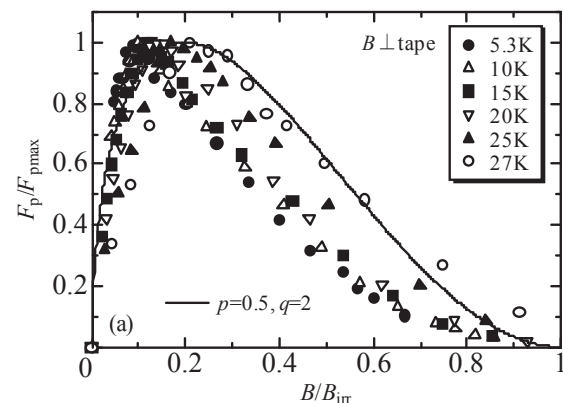


Fig.2 Temperature and magnetic-field dependence of F_p SiC doped MgB₂/S20C tape with hot pressing. (a) perpendicular field, (b) parallel field

(参考文献)

[1] 新田晃央, 他: 第75回2006年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 P.46

[2] H. Kuwashima et al, IEEE. Trans. Appl. Supercond, Vol.18 (2008) to be published.

MgB₂/Ni 多層膜の J_c - B 特性 J_c - B characteristics of alternately-layered MgB₂/Ni thin films

土井 俊哉, 日高 祐貴, 白樂 善則 (鹿児島大); 北口 仁, 高橋 健一郎 (物材機構);

波多 聡, ハリニ ソシアティ, 池田 賢一, 中島 英治 (九大)

DOI Toshiya, HIDAKA Yuki, HAKURAKU Yoshinori (Kagoshima Univ.); KITAGUCHI Hitoshi, TAKAHASHI Kenichiro

(NIMS); HATA Satoshi, SOSIATI Harini, IKEDA Ken-ichi, NAKASHIMA Hideharu (Kyusyu Univ.)

E-mail: doi@eee.kagoshima-u.ac.jp

1. はじめに

二ホウ化マグネシウム(MgB₂)は、金属系超伝導体の中で最高の超伝導転移温度 ($T_c=39$ K)を有している。また、構成元素が 2 種類と少ないことから組成制御が比較的容易であると考えられ、更に構成元素である Mg と B はいずれも資源的に豊富で安価であり、環境にも優しい。このようなことから、実用化に向けて精力的に研究開発が行われている。

我々は、MgB₂ 中のピンニングセンターについての研究を系統的に進めてきており、これまでに柱状結晶の粒界[1]、B リッチ組成によって導入された欠陥[2]、MgO が有効なピンニングセンター[3,4]であることを報告してきた。今回、MgB₂ 薄膜中に異なる間隔で導入した極薄 Ni 層が極めて効果的にピンニングセンターとして働くことを報告する。

2. MgB₂/Ni 多層膜の作製方法

Ni/MgB₂ 多層膜は、Coaxial Vacuum Arc Deposition (CVAD)銃を備えた電子ビーム蒸着装置によって作製した。基板温度 250°C で、MgB₂ 層を 16 又は 20, 34nm 形成した後、Ni 層を 1nm 形成した。これを繰り返し、トータル厚さ約 300nm の 3 種類の MgB₂/Ni 多層膜を作製した[5]。比較のために、同様の条件で 16nm 厚さの MgB₂ 層を 20 回積層した MgB₂ 単層膜も作製した。得られた試料は Ni 層と MgB₂ 層の間の反応や拡散も無く、綺麗な多層膜が得られていることを確認している[5]。

3. 結果と考察

MgB₂ 単層膜、16、22、35nm 間隔で Ni 層を挿入した MgB₂/Ni 多層膜に、4.2K で磁場を印加しながら J_c を測定した。何れの試料も自己磁場中の J_c は 10^6 A/cm² を越えており、良質の試料が作製できていることが確認できた。MgB₂ 単層膜では柱状結晶がピンニングセンターとして働くために膜面に垂直に磁場を印加したときの $J_c(\perp)$ の方が平行に印加したときの $J_c(\parallel)$ よりも高いが、多層膜ではほぼ全磁場領域で $J_c(\parallel) > J_c(\perp)$ であった。また、Ni 層間隔 16nm の多層膜に平行に 6T、12T の磁場を印加したときの J_c は、 1×10^6 、 1×10^5 A/cm² を越える非常

に高い値を有していた。図 1 に膜面に平行に磁場を印加した時の体積ピン力 F_p の印加磁場依存性を示す。MgB₂ 単層膜では全磁場領域でほぼ一定の値であるのに対して、多層膜では Ni 層間隔が量子化磁束線の間隔とほぼ一致する磁場で明瞭なピークが観察された。また、Ni 層間隔 35nm の多層膜のピークにおける体積ピン力は 90 GN/m³ と非常に高い値であることが分かる。

以上の結果は、MgB₂ 薄膜に挿入した強磁性 Ni 層がピンニングセンターとして有効に働いていること、及び Ni 層を量子化磁束線格子の間隔に一致させること、及び一致しない間隔では Ni 層を挿入しないことで非常に大きなピンニング力が得られることを示している。

本研究の一部は文部科学省科学技術振興費委託研究、19 文科振第 174 号、文部科学省ナノテクノロジー総合支援プロジェクト(九州大学超高压電子顕微鏡室)の一環として実施された。

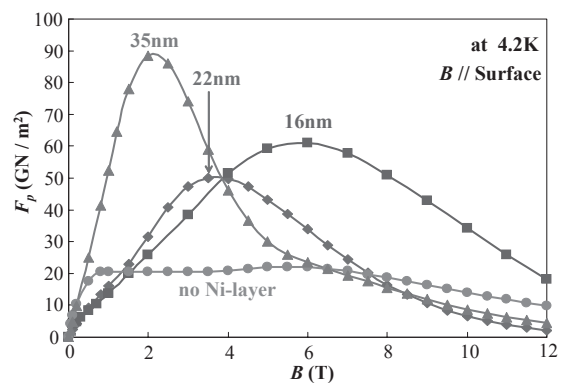


Fig.1 F_p - B characteristics of the MgB₂/Ni thin films

- [1] H. Kitaguchi et al., APL **85**(2004)2842.
- [2] K. Nagatomo et al., Physica C **426-431**(2005)1459.
- [3] M. Okuzono et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. **15**(2005)3253.
- [4] M. Haruta et al., JAP **102**(2007)076114-1
- [5] T. Doi et al., SUST **20**(2007)1223.

電子ビーム蒸着法で作製した MgB₂/Ni 多層膜の 2 次元磁束ピンニング特性

Two dimensional flux pinning properties of MgB₂/Ni multilayered films prepared by electron beam evaporation

米倉健志、梶田龍、清山輝彦、末吉哲郎、藤吉孝則(熊本大学); 土井俊哉(鹿児島大学);
北口仁(物質・材料研究機構); 淡路智、渡辺和雄(東北大学),

YONEKURA Kenji, KAJITA Ryu, KIYOYAMA Teruhiko, SUEYOSHI Tetsuro, FUJIYOSHI Takanori (Kumamoto Univ);
DOI Toshiya (Kagoshima Univ), KITAGUCHI Hitoshi (NIMS), AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ)
E-mail:kenji@st.cs.kumamoto-u.ac.jp

1. はじめに

MgB₂ 超伝導体を電子デバイス応用するには低温製膜の as-grown 法で作製した薄膜が望ましい。また、応用の際には磁場中での臨界電流密度 J_c の向上が必要となるが、さらに磁場の印加角度に対する J_c の異方性が小さいことが望まれる。

本研究では、電子ビーム蒸着法を用いて MgB₂/Ni 多層膜を Si 基板上に作製し、無添加の MgB₂ 薄膜との比較を行った。電子ビーム蒸着法で作製した MgB₂ 薄膜は、柱状に成長した結晶粒における結晶粒界が 1 次元ピンニングセンターとして働くことが知られている^[1]。さらに Ni 層を挿入して多層膜にすることで Ni 層を 2 次元ピンニングセンターとして作用させ、異方性を小さくすることを目的とした。

2. 実験

電子ビーム蒸着法を用いて Si 基板上に MgB₂ 薄膜と Ni を交互に堆積させた MgB₂/Ni 多層膜と Ni 層を挟んでいない MgB₂ 薄膜を作製した^[2]。作製時の背圧は 5×10^{-7} Pa であり、基板温度は 250°C である。Ni 層の間隔と磁束格子間隔が一致する磁場をマッチング磁場とし、Ni 層の間隔を変化させて、マッチング磁場付近での J_c の振舞いを調べた。マッチング磁場が 3T の試料を S1(3T)、1T の試料を S2(1T)、Ni 層を挟んでいない試料を S3(pure) とする。Ni 層の厚さは全て 0.3nm であり、S1(1T) は MgB₂ 層を 24.4nm、S2(1T) は 42.3nm となっている。

通電特性を測定するために薄膜作製後、フォトリソグラフィによって幅 50 μ m、長さ 1mm のマイクロブリッジパターンに加工した。四端子法によって電流-電圧特性を測定し、電界基準を 1×10^{-3} V/m として J_c の磁場依存性、 J_c の磁場角度依存性を評価した。磁場印加角度は膜面に対して垂直な場合を $\theta=0^\circ$ としている。

3. 実験結果

各試料の超伝導転移温度 T_c は、それぞれ S1(3T):23.2K、S2(1T):20.9K、S3(pure):32.9K であった。Fig.1 に J_c の磁場依存性を示す。Ni 層を導入した S1(3T) と S2(1T) の試料では、基板に対して平行な磁場では、マッチング磁場である 3T 付近と 1T 付近でそれぞれピークが見られ、特に S1(3T) はピーク付近では T_c が著しく低下しているにもかかわらず、S3(pure) の J_c を上回っている。

Fig.2 に 3T における J_c の磁場角度依存性を示す。基板に対し垂直な磁場での S3(pure) の J_c のピークは MgB₂ の結晶粒界の寄与によるものと思われる。S1(3T) は基板に対して平行な磁場を印加したときに非常に大きなピークが存在している。これは Ni 層がピンニングセンターとして機能したためである。このことから、Ni 層が

ピンニングセンターとして働き、その間隔を変えることでマッチング磁場を変えることができることを確認できた。また、 E - J 特性を測定し、磁束グラス-液体転移温度 T_g 、また T_g における E - J 特性の n 値に相当するピンニングパラメータ m を導出した。この磁場依存性から、2 次元ピンニングセンターの特徴について議論する。

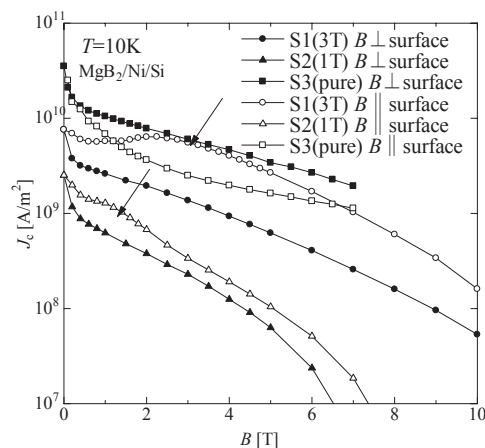


Fig.1 Magnetic field dependence of J_c

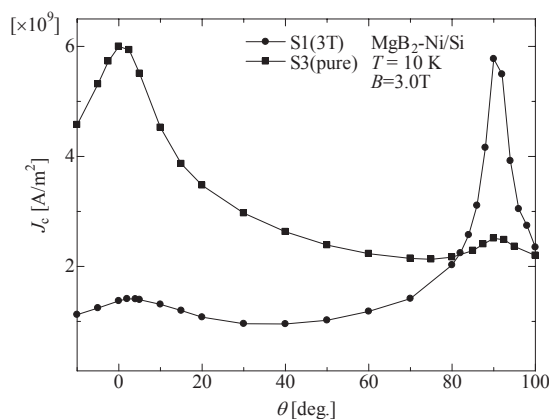


Fig.2 Angular dependence of J_c

参考文献

- [1] M. Haruta, et al., Supercond. Sci. Technol. **18** (2005) 1460.
- [2] Z. Mori, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. **17** (2007) 2891.

MO 観察による非対称な人工ピンを導入した超伝導 Nb 膜の磁束ピンニング特性の評価 Evaluation of flux pinning properties of superconducting Nb films with asymmetric artificial pinning centers by magneto-optical observation

何 継方, 原田 直幸, 内藤 裕志, 松村 直也, 浅田 裕法 (山口大); 石橋 隆幸 (長岡技科大)

HE Jifang, HARADA Naoyuki, NAITOU Hiroshi, MATSUMURA Naoya, ASADA Hironori (Yamaguchi Univ.); ISHIBASHI Takayuki (Nagaoka Univ. of Tech.)
E-mail: jifanghe@yamaguchi-u.ac.jp

1. はじめに

電流の流れる方向に対して垂直な断面の形状が非対称となる人工ピンを導入することにより、電流の通電方向に対して非対称となる臨界電流密度特性を持つ素子の実現が可能である。これまで、磁束密度分布を直接観察できる MO (Magneto-optical) イメージング法を用いて、非対称なステップ溝状人工ピンを導入した Nb 膜における磁束分布を観察した。

本研究では、測定温度を変化させ、MO イメージング法で、非対称なステップ溝状人工ピンの導入により磁束の出入りが非対称になることを明らかにするとともに、増磁過程の MO 観察像を用いて、試料内部に侵入した磁束の幅より試料の臨界電流密度を近似的に求めた。

2. 実験方法

フォトリソグラフィ技術を用いて、厚さが 0.5 μm の Nb 膜の 0.5mm × 1.0mm 領域に 5.0 μm の加工周期で Fig.1 に示す非対称なステップ溝状人工ピンを導入した。人工ピンを導入した Nb 膜における磁束密度の分布を直接観察するために、MO イメージング法を用いた^[1]。ここでは、ゼロ磁場において測定温度まで冷却後(ZFC:zero-field-cooled)に試料表面に垂直に磁場を印加して増加させた後、減少させた。測定温度は 3.8K、4.3K、5.0K と設定した。

また、Fig.2 に示す増磁過程の MO 観察像を用いて、試料内部に侵入した磁束の幅 a と臨界電流密度 J_c の近似式^[2]

$$J_c = \frac{\pi B_a}{\mu_0 d \operatorname{arccosh}(W/a)} \quad (1)$$

から、臨界電流密度を算出した。ここで、 B_a は外部印加磁場、 W は試料の幅 (= 0.5mm)、 d は試料の平均膜厚である。

3. 実験結果と考察

Fig.1 は非対称なステップ溝状人工ピンを導入した Nb 膜の表面中央部分の SEM 写真である。Fig.2 (A)-(D)、(E)-(H)、(I)-(L)にそれぞれ 3.8K、4.3K 及び 5.0K における MO 観察結果を示す。これらの図の左右が長さ方向、上下が幅方向である。明るい部分ほど磁束密度が高いことに対応する。外部磁場が低い場合、最も明るい部分は試料の端にあり、印加磁場を増加させた場合、磁場の増加にしたがって、磁束は溝に垂直に試料の内部に侵入していくことが確認された。ただし、このとき、磁束の侵入の非対称性は観察されなかった。

Fig.3 は Fig.2 に示した MO 観察像から式(1)を用いて求めた試料の J_c の磁場依存性を示す。磁場または測定温度が大きくなると、 J_c が小さくなることが分かった。

Fig.4 は磁場を 40mT 以上に増加させて、その後減少させた場合の MO 観察結果を示す。Fig.4 の (A)、(C)、(E) に黒い矢印 M で示す磁束密度が最も低い部分の位置に対して、Fig.4 の (B)、(D)、(F) に白い矢印 N で示す磁束密度が最も低い部分の位置は共に下方向にシフトしていることを確認した。シフトした距離は測定温度に依存せず、 $34 \pm 1 \mu\text{m}$ であった。

今後は、MO イメージング法または直接通電による非対称なステップ溝状人工ピンを導入した Nb 膜の電流分布を定量的に評価していく予定である。

参考文献

- [1] J. He, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.193
[2] A. A. Ployanskii, et al.: Phys.Rev. B 53 (1995) p.8687

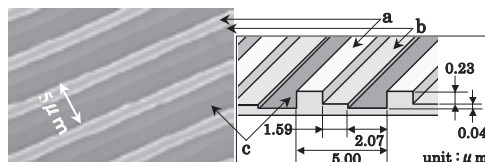


Fig.1 SEM image of the surface of Nb film with asymmetric step-groove-type APC.

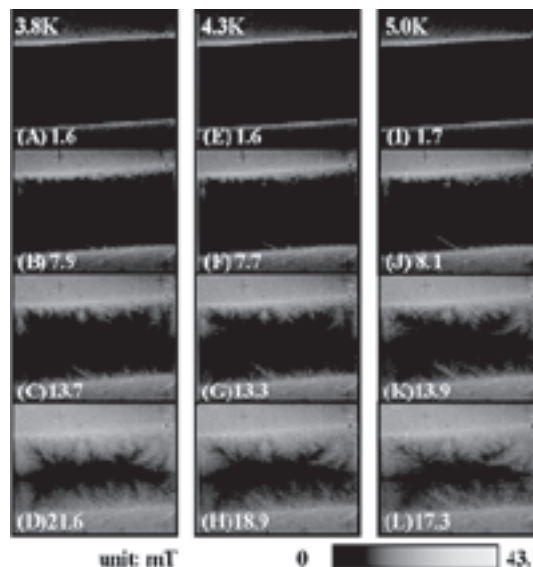


Fig.2 Magneto-optical images of the specimen with asymmetric step-groove-type APC for ZFC at (A)-(D) 3.8K, (E)-(H) 4.3K, (I)-(L) 5.0K after the external field B_a was gradually increased.

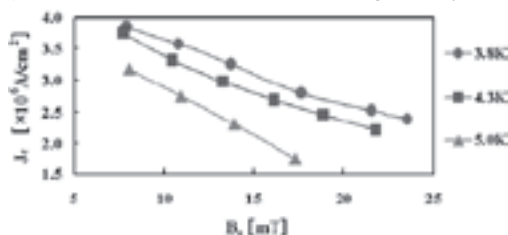


Fig.3 Magnetic field dependences of J_c calculated by using Eq. (1) for the specimen with asymmetric step-groove-type APC at 3.8K, 4.3K, 5.0K.

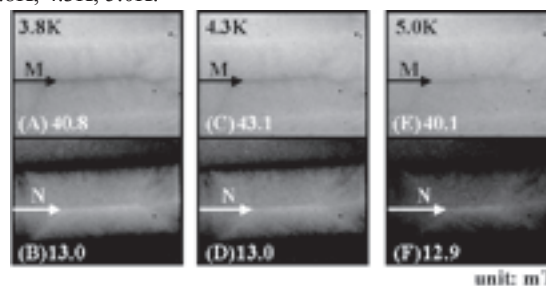


Fig.4 Magneto-optical images of the specimen with asymmetric step-groove-type APC for ZFC at (A), (B) 3.8K, (C), (D) 4.3K, (E), (F) 5.0K. The external field shown in (B), (D), (F) was reduced from the external field shown in (A), (C), (E) respectively.

大気圧空気を使った進行波型熱音響冷凍機の装置形状最適化

Experimental device optimization of

Traveling-wave thermoacoustic refrigerator using the atmospheric pressure air

下川 哲, 上田 祐樹, 秋澤 淳(農工大)

Satoshi Shimokawa, Yuki Ueda, Atsushi Akisawa(TUAT)

E-mail: 50007401210@st.tuat.ac.jp

1. 研究の概要と目的

熱音響冷凍機は、作動流体と流路壁面との間で行われる熱交換を利用してヒートポンプ現象を得る。作動流体は音波により圧縮・膨張するときに熱交換し、同時に変位するため、圧力変動と変位の位相差が性能を決める重要なパラメータになる^{[1][2]}。圧力変動と変位の位相差が $\pi/2$ の進行波音波を用いたヒートポンプ現象は、逆スターリングサイクルと同様の熱力学的サイクルで得られるため、従来開発されてきた定在波音波を用いた冷凍機に比べて性能を大きく向上できる可能性がある^[3]。進行波音波を用いたヒートポンプ現象のプロセスは、定在波音波を用いた場合と異なるため、高効率を達成する最適な装置形状も双方で異なることが考えられる。本研究では進行波音波を利用した熱音響冷凍機を製作し、装置形状が性能へ与える影響を実験的に調べた。

2. 実験装置

実験装置の概略図を図 1 に示す。本研究では進行波音波の励起が可能で、ループ管を含む共鳴管を製作した。実験装置はスピーカー、テーパ管、枝管、ループ管、蓄熱器、蓄熱器両端の熱交換機で構成され、装置内は大気圧空気を満たされている。枝管とループ管の接合点を原点とし、ループ管に沿って時計回りに座標軸を正とした。蓄熱器として 40mm の長さで積層したステンレスメッシュを用いた。枝管とループ管は内径 24mm のステンレス管で、ループ管平均周長 $L = 1.0\text{m}$ である。装置形状のパラメータとして蓄熱器の水力直径 HD [m] を変化させる。 HD の変化は蓄熱器として用いるステンレスメッシュの種類を変えることで実現した。蓄熱器両端の熱交換機 A, B には真鍮製の熱交換機を用いた。ループ管壁には小型圧力センサーを取り付けた。圧力センサーからの信号を FFT アナライザーに入力し、圧力振幅 p [Pa] と位相 ϕ [rad] を測定した。測定した p と ϕ から 2 センサー法^[4]を用いて流速振幅 u [m/s] と位相差 ϕ [rad]、音響パワー W [W] を算出した。本装置への入力 $x = -0.5\text{m}$ での W とし、 W_{in} と記述する。低温熱交換機にはヒーターを取り付け、熱負荷を加える事で冷凍出力 Q_c [W] を計測した。成績係数 COP [-] は式(1)で定義した。

$$COP = Q_c / W_{in} \quad (1)$$

3. 結果・考察

スピーカーに $f = 50\text{Hz}$, 16V の正弦波を入力し、実験を行った。蓄熱器水力直径 HD [m] は温度境界層厚さ δ_k [m] で無次元化した。実験では高温熱交換機温度 T_H を 298K に保ち、低温熱交換機温度 T_C との温度差 ΔT と計測パラメータの関係を、 Q_c を変化させることで求めた。蓄熱器上流側端を $x_R/L = 0.87$ の位置に設置し、各条件における $\Delta T = 10\text{K}$ のときの COP を図 2 に示す。図より COP は蓄熱器の水力直径に

大きく依存し、最適値があることが分かる。今回得られた進行波型熱音響冷凍機の最適値である HD/δ_k は 1.60 で、この値は定在波型熱音響冷凍機の最適値である $HD/\delta_k \approx 3.5$ に比べて小さい値であることがわかった。進行波を用いた場合、定在波を用いた場合に比べて良好な熱接触が求められるが、径を小さくしすぎると作動流体の粘性による損失が大きくなるため、最適値が得られたものと考えられる。

また、蓄熱器の設置位置を変化させるとループ管内の音場が大きく変化するため、 COP も大きく変化する。このため、蓄熱器の設置位置にも最適値が存在する。講演では蓄熱器の設置位置を変化させた場合の結果についても発表する。

参考文献

- [1] 富永 昭, 熱音響工学の基礎, 内田老鶴園, (1998)
- [2] T. Yazaki, et al., Traveling Wave Thermoacoustic Engine in a Looped Tube, Physical Review Letters 81, (1998), pp. 3128-3131
- [3] Y. Ueda, Traveling-Wave Thermoacoustic Refrigerator, JSME, B-73(727), pp. 839-846 (in Japanese)
- [4] A. Fusco, et al., 2-sensor Power Measurements in lossy ducts, Journal of the Acoustical Society of America 91, (1992), pp. 2229-2235

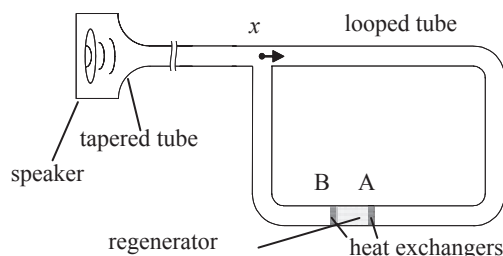


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus.

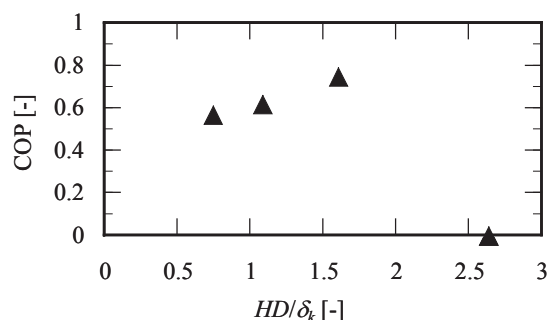


Fig. 2 Measured COP as a function of HD/δ_k . ($x_R/L=0.87$)

温度勾配による管内進行波音波の増幅と減衰

Thermoacoustic amplification and attenuation of sound waves traveling in a tube with temperature gradients

小松 遼, 琵琶 哲志(東北大)

KOMATSU Ryo, BIWA Tetsushi (Tohoku Univ.)

E-mail: komatsu@amsd.mech.tohoku.ac.jp

1. 緒言

1979年, Ceperleyは進行波音波を用いたピストンのないスターリングエンジンを理論的に提案した^[1]. ピストンのないスターリングエンジンでは, 音波がピストンの役割を担い, 熱力学的サイクルを実行する. 得られた出力仕事の結果として蓄熱器通過後の進行波音波の音響強度が増幅する. ここで音響強度とは音波が輸送する単位断面積, 単位時間あたりのエネルギーを表し,

$$I = \frac{1}{2} p u \cos \theta \quad (1)$$

と表される. p , u はそれぞれ圧力振幅, 断面平均流速振幅を表し, θ は圧力と断面平均流速の位相差を表す.

この提案は進行波音波を用いた可動部のないエンジン^[2, 3]や冷凍機^[4]の開発の先駆けとなり, 熱音響学の発展に大きく貢献した. しかし, 提案そのものは発案者である Ceperley 自身の実験失敗も含め, 未だに実証されていない. この提案を実証し, 熱音響学の基盤を固めることは, 非常に大きな価値がある. 我々はこの提案を実証するにあたり, 以下を Ceperleyの実験の問題点として考えた.

- 十分な大きさの温度勾配であるか
- 十分な熱交換が可能な周波数を用いているか
- 蓄熱器の選択は適切であるか

本研究ではこれらの点を明確にし, 音響強度の増幅を実現するため, 蓄熱器両端の温度差 ΔT , 管内音波の周波数 f , 蓄熱器の流路半径 r_0 を変え, 様々な条件で実験を行った.

2. 実験装置及び実験方法

実験装置の概略図を Fig. 1 に示す. 内径 24mm のステンレス管を 150m 接続し, 片端にラウドスピーカーを接続した. 蓄熱器にはハニカムセラミックスを用い, ラウドスピーカーから 3.2m の位置に設置した. ハニカムセラミックスは $r_0 = 0.745\text{mm}$, 0.560mm, 0.340mm の 3 種類を使用した. 高温熱交換器は電気ヒーターにより加熱し, 低温熱交換器は冷却水により室温を保った. 進行波音波を実現するため, 管全長を長くするとともに管の終端部には反射波を小さくするための綿を挿入した. 管内音波はファンクションジェネレーターを用いて swept-sine 波でラウドスピーカーを駆動し, $3 < f < 200$ Hz の音波を管内に伝播させた. 管内圧力は管壁に取り付けた圧力センサを用いて計測し, 音響強度の算出には Two-sensor 法^[5, 6]を用いた. また, 蓄熱器の入口温度 T_{in} 及び出口温度 T_{out} を用いて $\Delta T = T_{out} - T_{in}$ とし, 蓄熱器における音響強度の増幅, 減衰を表すパラメーターとして音響強度のゲイン G を次式で定義する.

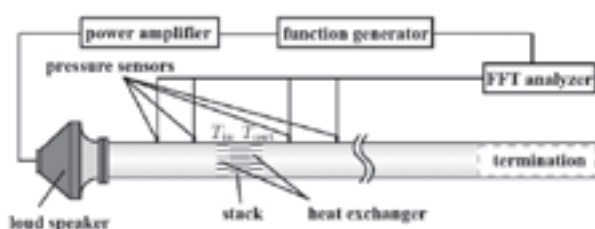


Fig.1 Experimental apparatus.

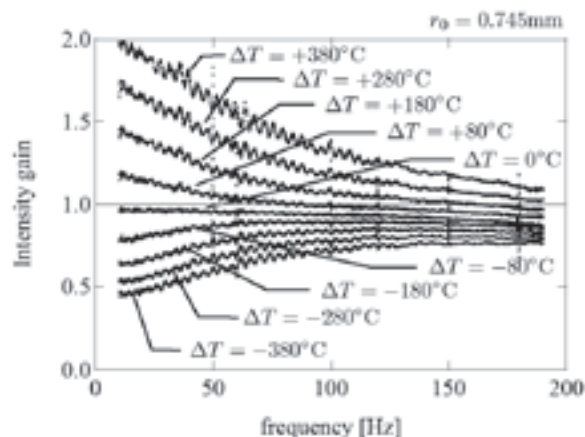


Fig.2 Sound intensity gain versus frequency.

$$G = \frac{I_{out}}{I_{in}} \quad (2)$$

但し I_{in} , I_{out} はそれぞれ蓄熱器入口側端面における音響強度, 出口側端面における音響強度を表す.

3. 実験結果

Fig. 2 に実験結果の一部として, 蓄熱器 ($r_0 = 0.745\text{mm}$) に温度勾配を与えた場合の音響強度のゲインの周波数依存性を示す. 上から $\Delta T = +380^\circ\text{C}$, $+280^\circ\text{C}$, $+180^\circ\text{C}$, $+80^\circ\text{C}$, 0°C , -80°C , -180°C , -280°C , -380°C におけるゲインを表す. $G = 1$ の時は増幅も減衰もないことを示す. 蓄熱器に温度勾配がない時, $G < 1$ であるのは蓄熱器における散逸のためである. 温度勾配がない時と比較すると, 蓄熱器が正の温度勾配を有する時にゲインは大きく, 負の温度勾配を有する時には小さくなり, 温度勾配が急勾配になればなるほど大きく増幅や減衰していることがわかる. さらにどの温度勾配を与えた時も, 低周波数帯では高周波数帯と比較して大きな音響強度の増幅や減衰が見られる. すなわち, 音響強度の大きな増幅を得るためには, 蓄熱器に大きな温度勾配を与え, 低周波数音波を用いることが不可欠である.

以上より, 十分大きな温度勾配を蓄熱器に与えるか, 低周波数音波を用いることにより, 音響強度の増幅は実現される. 蓄熱器の流路半径の影響, 及び無次元パラメーター ωr による蓄熱器でのエネルギー変換の大きさの統一的理解については口頭発表時に述べる.

参考文献

1. P. H. Ceperley: J. Acoust. Soc. Am., **66** (1979) 1508-1513.
2. T. Yazaki, et al.: Phys. Lett., **81** (1998) 3128-3131.
3. S. Backhaus, and G. W. Swift: Nature, **399** (1999) 335-338.
4. T. Yazaki, et al.: Appl. Phys. Lett., **80** (2002) 157-159.
5. A. M. Fusco, et al.: J. Acoust. Soc. Am., **91** (1992) 2229-2235.
6. T. Biwa, et al.: Rev. Sci. Instrum., **78** (2007) 086110.

パルス管冷凍機における音響インピーダンスの計測

Measurement of acoustic impedance in a pulse tube refrigerator

岩瀬 貴志, 琵琶 哲志(東北大学)

IWASE Takashi, BIWA Tetsushi (Tohoku univ.)

E-mail: iwase@amsd.mech.tohoku.ac.jp

1. はじめに

パルス管冷凍機は、低温部に可動部品がないことを特徴とする。構造が単純なため軽量・メンテナンスフリー・長寿命・低振動といった利点がある。このため実用化に向けたオリフィス型¹⁾やダブルインレット型²⁾などが提案され発展を遂げてきた。これに伴い、“可動部品がないのになぜ冷えるのか”、“構成要素(オリフィスバルブやバッファータンク)の役割はどう理解されるか”という点にも興味を持たれるようになった。理論的に振動流の流速振幅 $U (= u \exp(i\omega t))$, 圧力振幅 $P (= p \exp(i\omega t))$, 及び流速と圧力の位相差 Φ が本質的であるが理論的に示されてきた^{1), 2)} (U, P は複素振幅)。しかし、実験的にはほとんど観測されていない。パルス管冷凍機を理解する上で実験的理解は重要と考えられる。

そこで、振動流ダイナミクス及び構成要素の役割を実験的に理解するために、試作したオリフィス型パルス管冷凍機の U, P , 及び Φ をレーザードップラー流速計(LDV)と小型圧力センサにより同時計測した。その結果から、オリフィスバルブは圧力と断面平均流速の比で表わされる音響インピーダンス $Z (= (P/AV) \exp(-i\Phi))$; ここで A はパルス管断面積, V は断面平均流速である。)の調整役を担うこと、そして Z の偏角が 0 度に近いとき冷凍性能が最も高くなることを示す。

2. 実験装置及び実験方法

LDV による計測を行う前に、試作したオリフィス型パルス管冷凍機の冷凍性能試験を行った。その結果からオリフィスバルブの開度によって冷え方が違うことを確認した。

Fig.1 に示すオリフィス型パルス管冷凍機の全長 L は 237 mm であり、計測部のパルス管(ガラス管)の外径 D は 16 mm, 内径 d は 13.44 mm である。パルス管には圧力計測、及びシーディング粒子供給用のダクトを取り付けてある。上部、及び下部パルス管の間には、熱交換器と蓄冷器を設置した。蓄冷器には 250 メッシュのステンレスメッシュを 50 mm 積層した。バッファータンクの容量は $0.483 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ である。ファンクションジェネレータを用いて周波数 5.9 Hz の正弦波を出力し、ウーハースピーカーで加振した。パルス管内充填気体は大気圧の室温空気である。LDV 用のシーディング粒子としてオイルミストを用いた。

実験方法は、ウーハースピーカーとの接続口を $z = 0 \text{ mm}$ として、オリフィスバルブを 1 回転させるごとに $z = 20.54 \text{ mm}$ から $z = 210.54 \text{ mm}$ までのパルス管内の中心流速を計測し、断面平均流速を求めた。圧力センサは、下部パルス管を計測する際には下から 2 番目のダクトに、上部パルス管を計測する際には 7 番目のダクトに設置した。8 番目のダクトには圧力センサを固定し、計測中の圧力振幅を常に確認した。

3. 実験結果

蓄冷器低温端に最も近い $z = 170.54 \text{ mm}$ における音響インピーダンスに着目する。Fig.2 の複素平面上にそれを示す。バルブを閉じた状態では位相差はほぼ 90 度であり、音響インピーダンスは純虚数に近い値を取る。バルブの開度を大きくすると図のように半円状の軌跡を描くようにして再び虚軸に近づく。

今回試作した冷凍機ではバルブの開度が 4~6 rot. でよく冷えた。このバルブの開度に対応する音響インピーダンスは、

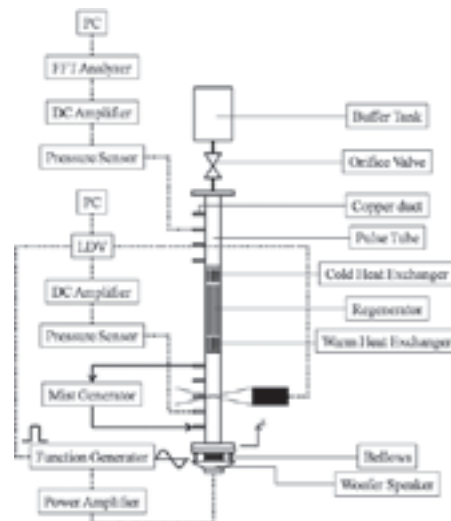


Fig.1 Experimental setup

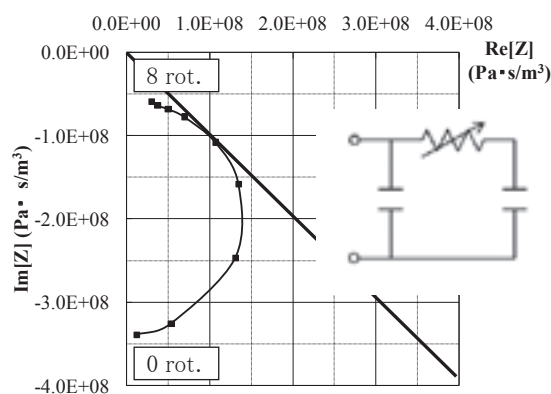


Fig.2 Acoustic impedance

原点を通る直線と半円状の軌跡との接点となることがわかる。このときの音響インピーダンスの偏角は最も進行波位相に近づくので、冷凍性能にとって位相差は重要である。今回得られた半円状の音響インピーダンスの軌跡は、挿入図のような等価回路を示唆する。つまり、バルブは可変抵抗として、バッファータンクはキャパシターとしての役割を持つことを意味する。

参考文献

1. E. I. Mikulin, et al.: Adv. Cryog. Eng. **29** (1984) p.629
2. S. Zhu, et al.: Cryogenics **30**, ICEC 13 Suppl. (1990) p.257
3. 富永 昭: 熱音響工学の基礎, 内田老鶴圃, 東京都 (1998)
4. A. Tominaga: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 27 (1992) p.147

小型スターリング型パルス管冷凍機による Ge ガンマ線検出器の冷却

Germanium gamma-ray detector cooling by a Stirling-type pulse tube cryocooler

香山 富義, 笠見 勝祐(KEK); 小池 武志, 白鳥 昂太郎, 田村 裕和(東北大);
竹内 孝行, 保川 幸雄(FES); 小野 浩(セイコーEG&G)

HARUYAMA Tomiyoshi, KASAMI Katsuyu (KEK); KOIKE Takeshi, SHIROTORI Koutaro, TAMURA Hirokazu (Tohoku Univ.)
TAKEUCHI Takayuki, YASUKAWA Yukio (FES); ONO Hiroshi (Seiko EG&G)

E-mail: haruyama@post.kek.jp

1. はじめに

小型スターリング型パルス管冷凍機(定格冷凍能力: 2.5W@70K; 100W入力、富士電機システムズ[1])により、ゲルマニウム(Ge)ガンマ線検出器を 71Kまで冷却し、所定のガンマ線検出分解能を得ることに成功した。このGe 検出器は高い中性子バックグラウンドで使用するため、85K以下に冷却保持しないと性能劣化を引き起こす。従来の液体窒素やJT冷凍機冷却では 90K程度までしか冷却できないため、小型冷凍機によるGe冷却を試みた。振動によるノイズを抑えるためパルス管冷凍機を用い、長時間に及ぶ実験のため、長期間メンテナンスが不要なスターリング型パルス管冷凍機を採用した。

最終実機の配置等の制限から、構成はスプリット型とし Ge 検出器と冷凍機をストレート(直線状)に配置した。実機 1号機に至る経過、運転条件、冷却特性、長時間安定性等について報告する。

2. ハイパー原子核実験用 Ge 検出器

ハイパー原子核は陽子、中性子からなる通常の原子核にラムダ粒子等の重粒子が入ったもので、放出されるガンマ線を調べることでハイパー原子核の内部構造や核力を明らかにすることができる。この実験装置は Hyperball-J と呼ばれ、Ge 検出器をハイパー原子核の生成標的を取り囲むように取り付け、高感度ガンマ線分光実験を行うものである。1 個の Ge 結晶は寸法が外径 70mm Φ 、長さ 70mmの円筒状で、断熱真空容器に入っている。実機ではこの Ge 検出器が 20~30 台セットされ、低温に冷却、ガンマ線を検出する[2]。1.33MeV のガンマ線に対し 2~3keV の分解能が要求される。

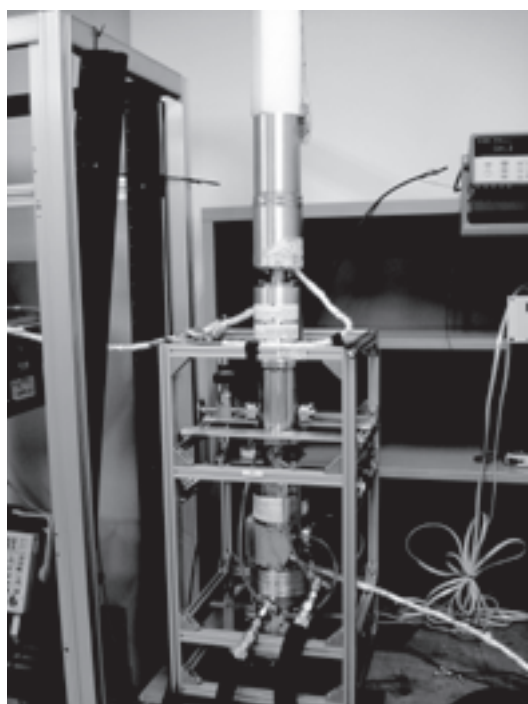


Fig.1 In-line setup of Ge gamma ray detector and cryocooler for final configuration.

3. 小型スターリング型パルス管冷凍機

Hyperball-Jの実験では前述したように Ge 検出器の中性子の影響を避けるため、85K 以下に冷却することが必要となる。振動、長時間運転を考慮し採用したスターリング型パルス管冷凍機の標準仕様を Table 1 にまとめた。標準形状はインテグラル型だが、実験装置の要請からこれをスプリット型にした上で Ge 検出器と冷凍機をストレートに配置した。Fig. 1 に全容を示す。

Table 1 Specification of Stirling pulse tube cryocooler (FES:CZX) for Ge detector cooling (Standard type).

Cooling power	2.5 W at 70 K
Compressor power input	100 W
Life time	50,000 h
Dimension	approx. 120 X 270 X 260 mm ³

4. 冷却特性

Ge 検出器をパルス管冷凍機で冷却したときの特性を Fig.2 に示す。冷凍機運転条件は 160W の電気入力で、ピストン位置や立ち上げ時の調整が可能な専用の電源コントローラを用いた。圧縮機の冷却は 5~10°C の水冷で行った。Ge 検出器および冷凍機コールドヘッドは真空チェンバに入っており、1X10⁻⁴Pa の真空を保持した。10 時間ほどで定常冷却状態となり、コールドヘッドと Ge 検出器の温度差はおおよそ 13K であった。この温度差は Ge 検出器とコールドヘッドを熱的にリンクする機構による。

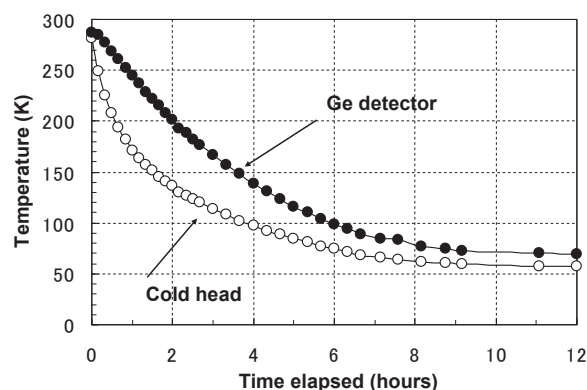


Fig.2 Cooling characteristics of cold head and Ge detector

5. まとめ

Ge ガンマ線検出器をスターリング型パルス管冷凍機で 71K まで冷却することに成功した。今後は、最終的な実験装置に組上げる際の配置、排熱等について検討する。

参考文献

1. N. Matsumoto, et al.: Adv. Cryo. Eng., Vol. 49B (2004) pp. 1339-1346
2. T. Koike, et al.: Presented at JPS Conference, Tokyo, (March 2007) 27pSC-3

Pt-Rh線を複合化したDy-123系超伝導溶融体の超伝導特性 Superconductivity of Dy-123 system superconductor composed with Pt-Rh wire

島田 浩典, 吉澤 秀二 (明星大); 藤本 浩之 (鉄道総研)

SHIMADA Hironori, YOSHIZAWA shuji (Meisei Univ.); FUJIMOTO Hiroyuki (Railway Technical Research Institute)

E-mail: shimada.00s3059@jcom.home.ne.jp

1. はじめに

希土類 (RE) 系超伝導溶融体は、非超伝導相である Dy-211 の微細分散により、より高い磁場の捕捉が可能である。しかし、高磁場中で冷却を行うと、誘起電流により熱が生じ、マイクロクラックが形成・密集し、最終的には破断に至ることが報告されている。これまで、我々は発熱を直接金属線で外部に逃がすことを目的として、成型する前に Pt 線を複合化して Dy-123 系超伝導溶融体の作製を試みた。その結果、大気中では Pt 線が酸化相と反応してしまうことを確認した。そこで、Pt の合金であり、Pt 線より融点の高い、Pt-Rh 線を複合化し溶融体を作製し、超伝導特性を評価した。

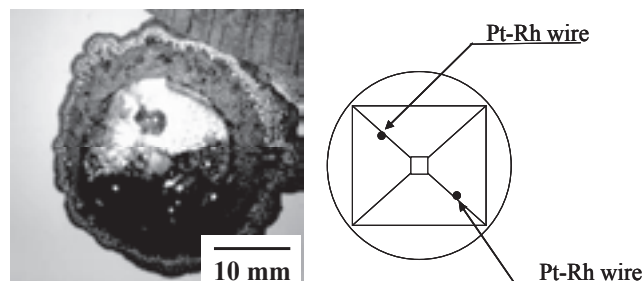


Fig.1 Optical photograph and illustration of the sample

2. 作製方法

出発原料として、仮焼粉である Dy-123 と Dy-211 を準備した。これらの仮焼粉を最適なモル比である 1:0.3 に秤量し、有機溶媒中で湿式混合した。さらに、融点降下と機械的強度の向上を目的に Ag₂O を 30 wt% 添加した。混合した粉末を直径 20 mm、高さ 20 mm の円盤状のバルク体にプレス機で成型した。成型する際に、Pt-Rh 線 (Pt:Rh=87:13) を複合化した。複合化した Pt-Rh 線は、直径 0.4 mm、長さ 15 mm を用いた。成型したバルク体の下に、バルク体と同様の混合モル比で Dy-123 と Dy-211 を有機溶媒中で湿式混合して、プレス機で成型した敷きバルクを置き、その下にアルミナ基板を置いた。

温度勾配を有する雰囲気炉を用いて、溶融凝固後、種付けを行い、単一ドメインの結晶を生成させた。種結晶として、Nd-123 の単結晶を用いた。結晶の成長時間は、170 時間とした。

作製した溶融体の超伝導評価として臨界温度 (T_c)・臨界電流密度 (J_c) および捕捉磁場測定、Pt-Rh 線近傍の評価として SEM-EDX および微小領域の XRD を用いた。捕捉磁場は、印加磁場 2 T とし、磁場中冷却法を用いて液体窒素中にて行なった。微小領域の XRD は、0.03 mm のコリメーターを用いた。

3. 結果と考察

Fig.1 に Pt-Rh 線を複合化した溶融体の外観写真と簡略図を示す。ファセットラインが種結晶を中心に形成していることから、表面において単一ドメインの成長が確認できた。また、Pt-Rh 線がドメイン内に複合化していることも確認できた。これは、結晶成長の際、Pt-Rh 線による結晶化速度への影響が小さいと判断できる。

作製した超伝導体の T_c は約 90K (off-set)、 J_c は 4.5 kA/cm² であった。

Fig.2 に捕捉磁場の測定結果を示す。印加磁場 2 T に対して、0.13 T の磁場を捕捉した。溶融体の磁場は、単一なピークを示している。これは、Pt-Rh 線による超伝導体への影響は小さいものと考えられる。これは、結晶成長時間を長くすることにより、さらに磁場を捕捉できる可能性がある、ことを示している。

Pt-Rh 線近傍の SEM 観察を行なったところ、Pt 線を複合化した溶融体と同様に、中央にある灰色の Pt-Rh 線の周囲に 3 つの層が花のように形成されていることがわかつ

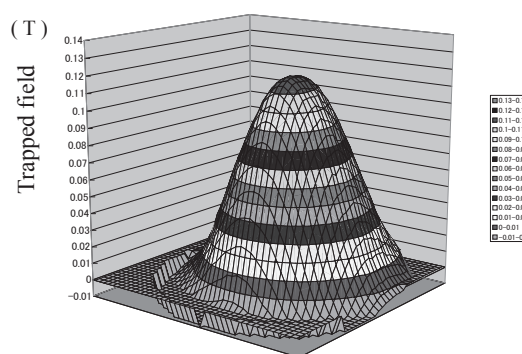


Fig.2 Trapped field distribution of the sample

た。このことから、Pt-Rh 線に含まれる一部の Pt が反応して、違う元素が混合している事が考えられる。また、Pt 線とは異なり、大気中にて Pt-Rh 線が完全に反応することはなかった。

そこで、中間層がどのような化合物もしくは単体で存在しているかを調べる為に、微小領域の XRD を用いた。それによると、外側の層では Ag、中間の相では BaO, CuO をメインとした Ba, Cu, Ag, Pt の多数の化合物、内側の層では Pt と Ag が存在することがわかった。

中間の相では、メインである BaO と CuO において数多くの化合物が検出された。また、外側の層である Ag の層では、測定の位置によりピーク強度に大幅な違いが見られた。内側の層では Ag と Pt が、酸化物ではなく、混在する状態で存在している可能性がある。

参考文献

- (1) 島田 浩典・吉澤 秀二・藤本 浩之：2007 年度秋季低温工学・超伝導学会、講演論文集 P.255
- (2) H. Shimada, H. Fujimoto and S. Yoshizawa 2008 Physica C, in press.

銀添加円柱状 RE123 溶融凝固バルクの作製と捕捉磁場特性

Fabrication of Ag-added RE123 Cylindrical Melt-Solidified Bulks and Their Field Trapping Properties

山崎 裕也, 石井 悠衣, 荻野 拓, 堀井 滋, 下山 淳一, 岸尾 光二 (東大院工)

YAMAZAKI Yuhya, ISHII Yui, OGINO Hiraku, HORII Shigeru, SHIMOAMA Jun-ichi, KISHIO Kohji (Univ. of Tokyo)

E-mail: tt076706@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp (Y. Yamazaki)

【緒言】 RE123($\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$)溶融凝固バルクを用いた様々な応用が検討されているが、より広範な実用には高い捕捉磁場特性を持つことが望ましい。従来、*a*-growth 領域は *c*-growth 領域よりも臨界電流特性に優れるとされ、実用バルクには *a*-growth 領域主体のバルクが用いられている。しかし、近年の我々の研究から、*c*-growth 領域は酸素量を適切に調節することによって *a*-growth 領域よりも優れた臨界電流特性を示すことがわかってきた[1]。前回 *c*-growth 領域を主領域とする円柱状 Dy123 溶融凝固バルクについて、*a*-および *c*-growth 領域の捕捉磁場分布を評価し、*c*-growth 領域では磁束密度分布が等方的であるのに対し、subgrain boundary が存在する *a*-growth 領域は異方的となることから、*c*-growth 領域が優れた捕捉磁場特性を示すことを明らかにした。今回は銀添加によって強度を向上したより実用的な円柱状溶融凝固バルクを作製し、その臨界電流特性および捕捉磁場特性について報告する。

【実験】 銀添加 Dy123 溶融凝固試料は以下のように作製した。予め作製した Dy123、Dy211 粉末を 7 : 3 のモル比になるように秤量し、 Ag_2O 10wt% と Pt 0.5wt% を加えて混合後、一軸加圧(1 t/cm^2)で $25 \text{ mm}\phi \times 32 \text{ mm}$ の円柱に成型した。溶融凝固は空气中で Nd123 単結晶を種結晶として用いて行い、酸素気流中 400°C でポストアニールした。溶融凝固バルクの *a*-growth 領域および *c*-growth 領域から切り出した $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}^3$ の試料に対し、磁場下で磁気光学像を観察し、SQUID による磁化測定から超伝導特性の評価を行った。77 K における溶融凝固バルクの捕捉磁場特性は、走査型ホールプローブを用いて評価した。

【結果と考察】 円柱状バルクは溶融凝固によって $21.5 \text{ mm}\phi \times 25 \text{ mm}$ まで収縮したが、種結晶から鉛直方向に 17 mm の部分までシングルドメイン化していることを確認した。*a*-および *c*-growth 領域から切り出した試料の臨界電流特性を Fig. 1 に示す。図の凡例は切り出した領域と種結晶からの距離を示している。*c*-growth 領域の種結晶の直下の *c*-1mm は RE211 の体積分率が低いため、低磁場下では J_c が低いものの、磁場下では優れた特性を示した。*c*-growth 領域の種結晶から離れた部分 *c*-5, 9, 13mm は高磁場下での J_c は *c*-1mm にやや劣るものの、低磁場では高い値を示した。これに対し、*a*-growth 領域は種結晶近傍では高い J_c を示すものの種結晶から遠ざかるとともに J_c が低下する傾向が認められた。これは *a*-growth 領域に存在する subgrain boundary および種結晶から遠ざかるにつれて低下する結晶配向性に由来するものである[2]。また前回報告した銀無添加試料よりもこの銀添加試料は高い臨界電流特性を示しており、これは CuO 鎖の Cu サイトに微量置換した銀の周囲がピンニングセンターとして働いたためと考えている[3]。

Fig. 2 に $21.5 \text{ mm}\phi \times 10 \text{ mm}$ となるように種結晶から鉛直

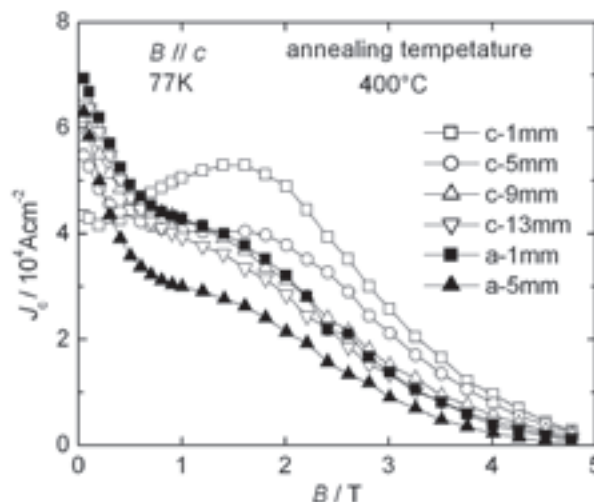


Fig. 1 Critical current properties of Ag-added Dy123 melt-solidified bulks cut from various part of a cylindrical one at 77 K.

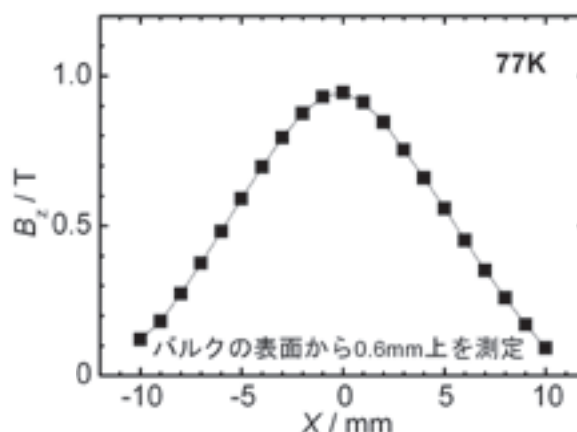


Fig. 2 Field trapping properties of a Ag-added Dy123 melt-solidified bulk at 77 K.

方向に 1 mm から 11 mm の部分を切り出した溶融凝固バルクの *c*-growth 領域側表面(種結晶から 11 mm)の捕捉磁場特性を示す。バルク表面全体にわたって等方的な磁束密度分布が観測され、さらに溶融凝固バルク表面中央部にホールプローブの先端を接触させたところ 1.04T という比較的高い捕捉磁場が観測された。これらはバルク全体にわたって高い臨界電流特性(平均電流密度: $2 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 以上)が実現していること意味する結果である。なお、*a*-growth 領域側表面の捕捉磁場特性は約 5%劣り、これは *c*-growth 領域のほうが高磁場捕捉に有利であることの傍証と考える。

参考文献

[1] T. Nakashima *et al.*, *Physica C* **463** (2007) 325.

[2] 中島他: 2007 秋季応用物理学学会 7a-ZH-9

[3] 中島他: 2007 秋季低温工学・超電導学会 3C-p01, 02.

球状バルク超電導体のアクティブ磁気浮上における安定性評価

Stability Position control of active magnetic levitation using sphere-shaped HTS bulk

陸 旭棟, 青木 徹, 石垣 善弘, 植田 浩史, 我妻 洸, 石山 敦士(早大);
岩本 晃史, 柳 長門, 三戸 利行(NIFS)

RIKU Kyokutoh, AOKI Tohru, ISHIGAKI Yoshihiro
UEDA Hiroshi, AGATSUMA Koh, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University);
IWAMOTO Akihumi, YANAGI Nagato, MITO Toshiyuki (NIFS)

1. はじめに

電磁石(以下、コイル)を用いて酸化物バルク超電導体(以下、バルク体)をアクティブ磁気浮上させるシステムは、コイルの通電電流量を変化させることでバルク体の浮上高度の制御が可能となる。さらに無制御で浮上安定性を確保できるため、鉛直方向の磁気浮上装置への応用が期待される。そこで本研究では、磁気浮上装置を慣性核融合に应用することを考えた。慣性核融合の課題の一つに、如何にして燃料を非接触でレーザー照射点に精度良く移動、静止させるかということがある。我々は、銅コイルを用いたアクティブ磁気浮上によって、ターゲットとなる球状バルク体を位置制御するシステムを提案し、その実験を行ってきた⁽¹⁾。これまで、コイル形状および配置を変えることで、安定浮上可能な磁場分布を作り、位置精度を向上させることに成功した。今回は実験および三次元電磁場解析によって、磁場分布と浮上安定性について評価したので報告する。

2. 実験装置

これまで我々は径5mmの球状バルク体の位置制御を行ってきた。しかし、従来のシステム(Fig. 1(a))では、バルク体の中心がコイルの中心から少しでもずれるとバルク体が外に弾き出されてしまうことが明らかとなった。そこで、水平方向に安定性を得るためにCoil 2の上方にCoil 3を設置し、Coil 3にCoil 2とは逆の電流を通電し、Coil 2,Coil3の間でバルク体を位置制御した(Fig. 1(b))。現システム(Fig. 1(b))の実験においてバルク体位置制御時の浮上高度の標準偏差は約21 μm であった。旧システム(Fig. 1(a))の標準偏差が約28 μm であったことから、まず位置制御の精度が改善された。また水平方向の安定性(復元力)を実際に測定し、水平方向の安定性を定量的に評価した。実験装置概略図をFig. 2に示す。諸元をTable 1に示す。

3. 安定試験結果

測定はCoil 2とCoil 3の間(浮上高度18mm)で行った。まず、Coil 1に直流電流5Aを通電してバルク体をField coolingにより着磁する。次にCoil 3にCoil 1,2とは逆向きの直流電流15Aを通電する。そしてCoil 1に15Aを通電しCoil 2にも同様に電流を通電して測定位置となる18mmにバルク体を浮上させる。そして、バルク体をコイルの中心軸からずらすことによって、水平方向の復元力を測定する。実験結果(四回試行)をFig. 3に示す。ここでグラフの横軸はコイル中心軸からの距離、縦軸はバルク体の水平方向の復元力である。ロードセルの分解能が、0.2Nが限界のため、グラフは0.2N刻みにプロットしている。

4. まとめ

思索浮上装置を用いて、水平方向の安定性評価を行い、良好な結果を得た。しかし慣性核融合への応用を考えるとさらに浮上高度の標準偏差を5 μm 以下、バルク体を径2mm以下の球殻状にしなければならない。今後は、より応用に近い形で位置制御と安定性の評価を行う予定である後はより応用に近い形で位置制御を行う予定である。

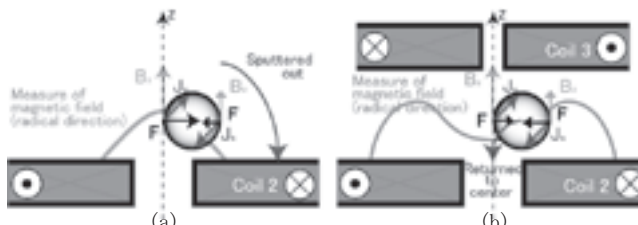


Fig. 1 Principle of stability of horizontal direction. (a) Previous system, (b) Present system.

Table. 1 Specifications of HTS bulk and coils.

HTS bulk		Coil 1	Coil 2	Coil 3	
Shape	Sphere	Inner diameter	26 mm	18 mm	7 mm
Material	DyBCO	Outer diameter	63 mm	62 mm	36 mm
Diameter	5 mm	Thickness	16 mm	16 mm	23 mm
Weight	4×10^{-4} kg	Number of turns	250	250	250

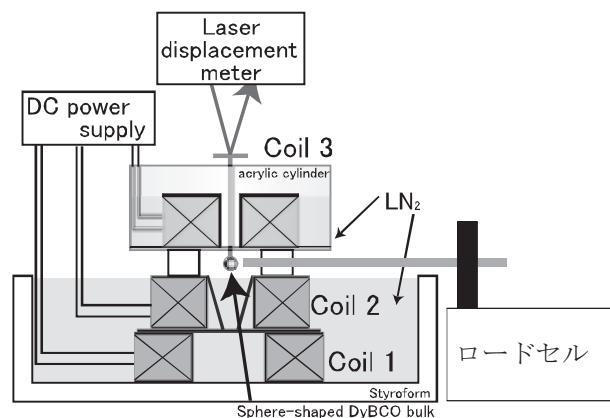


Fig. 2 Schematic drawing of experimental system.

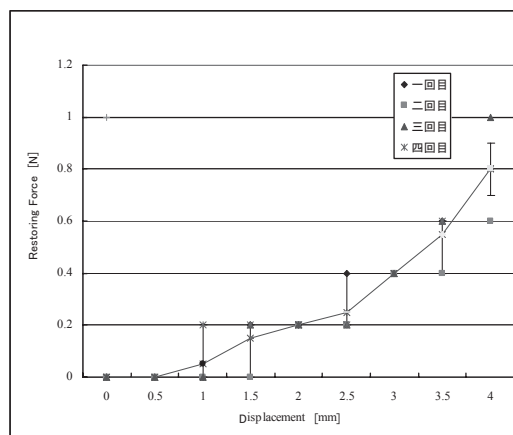


Fig. 3 Result of restoring force test

参考文献

- (1) H. Ueda, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 74 (2006) p.118

Gd 系 123 高性能溶融バルク緻密材の作製と特性評価

PREPARATION AND PROPERTIES OF HIGH-QUALITY MELT GROWTH GD123 BULKS WITH LOW VOID DENSITY

藤本 浩之 (鉄道総研) ; 手嶋 英一, 森田 充 (新日鐵)

FUJIMOTO Hiroyuki (Railway Technical Research Institute); TESHIMA Hidekazu, MORITA Mitsuru (Nippon Steel Corp.)

E-mail: fujimoto@rtri.or.jp

1. はじめに

希土類(RE)系酸化物高温超電導バルク材は、液体窒素温度でも高い臨界電流密度、強い捕捉磁界、さらに強い磁気浮上力を有し、強力磁石、非接触軸受、回転機、磁気分離、電流リードなど、種々の超電導応用機器が提案されている。バルク体の高性能化やバルク応用機器の実用化のためには、電磁気的特性とともに、機械的特性の把握とその向上が非常に重要である。一般に、希土類系バルク材は大気中での溶融法で作製されるが[1]、プロセスに起因して試料内部にボイド(気孔)が存在する。ボイドは欠陥であり、機械的強度向上のためにはボイド密度の低減が必要である。これまでに、酸素中溶融によってSm系やDy系のボイド密度を減少させ、機械的強度が改善することが報告されている [2]。そこで、本研究では、ボイド密度が低い、電磁気的特性の優れた Gd 系 ($\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$:Gd-123) バルク体試料を作製し、その特性(特に曲げ強度、破壊靱性などの機械的特性)を評価した。

2. Gd-123 の作製方法と特性評価項目

本研究で用いた Gd 系バルク材は、Gd 123 相:Gd 211 相 = 3:1 の組成比に 0.5wt% の Pt と 10wt% の Ag_2O を添加した原料粉を用い、試料内部のボイド密度を低減させるため酸素中で溶融させた後、大気中で結晶成長させるという二段階雰囲気調整熱処理法にて作製した。その結果、直径 46mm、厚さ 15 mm 程度の超電導バルク体を得た。ここでは、二段階雰囲気調整熱処理法にて作製したものを緻密材、比較のため全て大気中で作製したものを標準材と呼ぶ。図 1 に作製評価した Gd-123 緻密バルク材の外観写真を示す。機械的特性は、 $4 \times 3 \times 36 \sim 40 \text{ mm}^3$ の試験片を用いて室温にて四点曲げ試験で評価した。また、弾性率、破壊靱性、硬さ、粗さ、密度測定を合わせて行った。試料の組織は、外観観察、光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡(SEM)により評価した。さらに、超電導特性を評価した。

3. Gd-123 の機械的特性評価結果

本研究での酸化物高温超電導体の機械的特性評価は、ファインセラミックスの試験評価方法を参考に実施した。試験片は、円柱状バルク体を上中下の三段以上に切断加工した後、主に JIS R 1601(曲げ強度試験)に基づいた寸法・形状に切断加工して得た。そして試験片の表面をラッピングフィルムなどで鏡面仕上げして、組織を観察し、ボイド率、粗さ(JIS-B-0601)を測定した。室温での曲げ強度は、JIS R 1601 に従い、クロスヘッド速度が 0.5mm/s、サポートスパンの長さ $L = 30\text{mm}$ で四点曲げ試験を行い、破壊強度を求めた。また、ビッカース硬さ(JIS-Z-2244)は試験片各面で測定し、弾性率、破壊靱性も、JIS を参考に行った。

その結果、標準材では数十 μm 程度のボイドが多数存在する(ボイド率 15%程度)が、緻密材ではボイドがほとんど存在しない(ボイド率 3%以下)ことが分かった。図 2 に、室温での曲げ強度試験結果を示す。曲げ強度の平均値は、標準材で 58MPa、緻密材で 72MPa であり、組織の緻密化により 1.2 倍以上向上していることがわかる。機械的強度が改善した理由として、ボイド密度が低減し、試料が緻密になったためと考えられる。

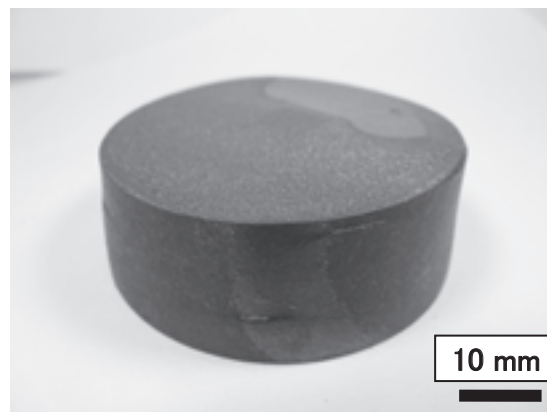


Fig.1 Photograph of single-domain Gd-123 High-Quality Melt Growth (H-QMG) superconducting bulk, 46 mm in diameter.

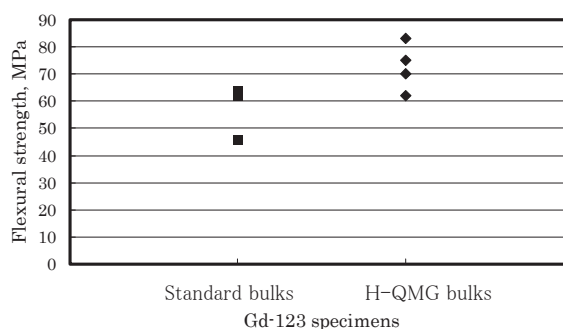


Fig.2 Flexural strength of the Gd-123 specimens; Standard bulks and High-Quality Melt Growth (H-QMG) bulks by the four-point bending test at room temperature.

さらに、緻密材の超電導特性は、77K、1T で J_c が $10,000\text{A}/\text{cm}^2$ 以上あり、酸素中で溶融させたにもかかわらず標準材と同程度であった。以上の結果から、Gd 系では、ボイド密度低減による機械的特性の改善と高い超電導特性の維持が両立することが明らかになった。

4. まとめ

酸素中で溶融法により作製した大型(直径 46mm)の単一ドメイン Gd 系バルク超電導緻密材(Gd-211 と Pt・Ag を添加)の曲げ強度などの室温での機械的特性は、標準材に比べ、高い値を示すことがわかった。

参考文献

1. M.Morita et al., Physica C 235-240 (1994) 209.
2. H.Teshima et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77, (2007), 2P-p13, p.158 [第77回 2007年度秋季低温工学・超電導学会]

BaZrO₃ 人工ドットを導入した(Nd,Eu,Gd)Ba₂Cu₃O_y 薄膜の超伝導特性向上

Improvement of superconducting properties on (Nd,Eu,Gd)Ba₂Cu₃O_y thin films by introducing BaZrO₃ artificial dots

一野 祐亮, 吉田 隆, 井上 晃一, 尾崎 壽紀, 高井 吉明(名大); 松本 要(九工大);
向田 昌志(九大); 喜多 隆介(静岡大); 一瀬 中(電中研); 堀井 滋(東大)

ICHINO Yusuke, YOSHIDA Yutaka, INOUE Kouichi, OZAKI Toshinori, TAKAI Yoshiaki (Nagoya Univ.);

MATSUMOTO Kaname (Kyushu Inst. of Technol.); MUKAIDA Masashi (Kyushu Univ.);

KITA Ryusuke (Shizuoka Univ.); ICHINOSE Ataru (CRIEPI); HORII Shigeru (Univ. of Tokyo)

E-mail: ichino@nuee.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

我々はこれまで、低温成膜(LTG)法で作製した(Nd,Eu,Gd)Ba₂Cu₃O_y (NEG)薄膜が従来のパルスレーザー蒸着(PLD)法で作製した試料よりも高い磁場中 J_c を示すことを報告してきた[1,2]。本報告では、LTG-NEG 薄膜の更なる磁場中特性向上を目的に、自己組織化によって c 軸相関ピンとなることが報告されている BaZrO₃ (BZO)[3] を添加した LTG-NEG 薄膜を作製し、磁場中特性を評価した。また、BZO の自己組織化を制御することを目的に、LTG 法と BZO ナノドットを組み合わせた modified-LTG (mLTG)法を開発し、併せて検討を行った。

2. 実験方法

NEG 薄膜は、PLD 法を用いて MgO(100)基板上に作製した。成膜時の酸素圧力は 1.0 Torr、NEG シード層を 870°C で、その上に BZO を 2 vol.% 添加した 400 nm 厚の NEG アッパー層を 780~840°C で作製した。上述の mLTG 法は、LTG 法に加えて、シード層上に予め PLD 法を用いて BZO ナノドットを設け、その上にアッパー層を成長させる手法である。この BZO ナノドットの数密度は、レーザーパルス数で制御した。以上で得られた薄膜の結晶構造を X 線回折法(XRD)、超伝導特性を直流四端子法、微細構造は透過型電子顕微鏡(TEM)で評価した。

3. 実験結果

BZO を含まない“pure”LTG-NEG および BZO をドーピングした LTG-NEG そして mLTG-NEG 薄膜は、XRD の結果から、NEG (001)[100]/MgO (001)[100]の方位関係を持ってエピタキシャル成長していることが分かった。また、BZO がドーピングされることで(005)面ロッキングカーブの半値幅は大きくなり、若干ではあるが結晶性の低下が認められた。

超伝導転移温度は、BZO ドーピングによって 1~3 K 程低下し、約 90 K であった。これらの薄膜の磁場印加角度に対する J_c の変化を 77 K、1 T 下で測定した。Fig. 1 に磁場印加角度に

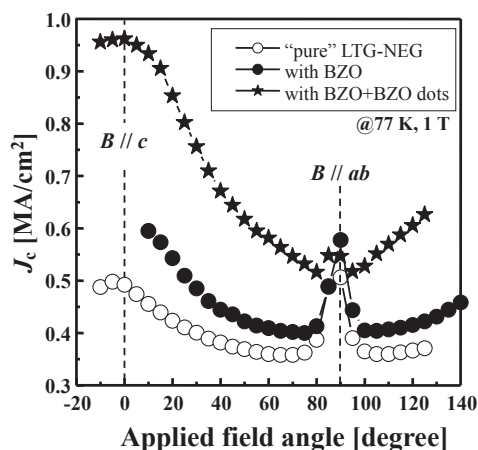


Fig. 1 J_c at 77 K and 1 T as a function of applied magnetic field angle.

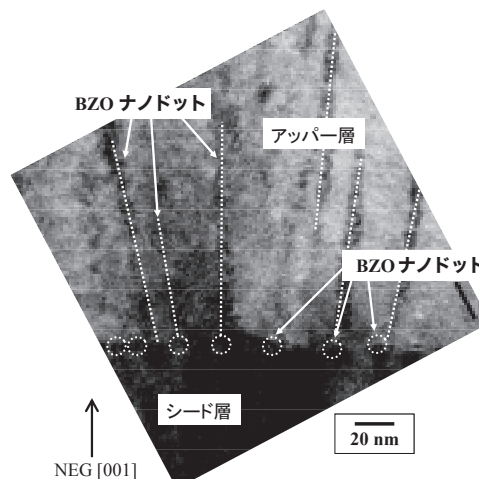


Fig. 2 High magnification TEM image confirmed the presence of BZO nanorods embedded in the mLTG-NEG film.

対する J_c の変化を示す。この図から、BZO を含まない“pure”LTG-NEG 薄膜(○)に比べ、BZO ドープ LTG-NEG 薄膜(●)は $B//c$ の J_c ピークが高くなっていた。BZO ナノドットを加えた mLTG-NEG 薄膜(★)はさらに $B//c$ の J_c が向上し、“pure”LTG-NEG 薄膜と比べて $B//c$ で約 2 倍の J_c を示した。つまり、ドーピングされた BZO が c 軸相関ピンとなっており、mLTG 法によってその密度が増加したために、 $B//c$ の J_c が大きく向上したと考えられる。

次に、TEM を用いて微細構造を観察した。Fig. 2 に mLTG-NEG 薄膜の TEM 像を示す。図から、アッパー層中に BZO ナノロッドが成長していることがわかる。ここでは示していないが、BZO ドープ LTG-NEG に比べて、mLTG-NEG 薄膜の方が BZO ナノロッドの密度は高かった。この結果は J_c の磁場印加角度依存性の結果と一致し、mLTG 法によって BZO ナノロッドの密度を制御できることを示している。

4. まとめ

BZO をドーピングした LTG-NEG 薄膜を作製し、磁場中特性および微細組織を評価した。その結果、BZO ドーピングによって $B//c$ の J_c が向上し、さらに BZO ナノドットを加えることで $B//c$ の J_c は約 2 倍となった。TEM の結果から、BZO ナノドット添加によって BZO ナノロッドの密度が増加していることが確認され、BZO ナノドットによって c 軸相関ピンを制御できることが明らかになった。

参考文献

1. K. Inoue, et al.: Physica C in press (2008)
2. K. Inoue, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.130
3. J. L. MacManus-Driscoll, et al.: Nature Materials, Vol. 3 (2004) p.439

電子ビーム蒸着法で作製した MgB_2 薄膜の微細組織の組成依存性Composition dependence on microstructure in MgB_2 film fabricated by electron beam evaporation

波多 聡, ハリニ ソシアティ, 池田 賢一, 中島 英治(九大); 土井 俊哉(鹿児島大); 北口 仁(NIMS)

HATA Satoshi, SOSIATI Harini, IKEDA Ken-ichi, NAKASHIMA Hideharu (Kyushu University);

DOI Toshiya (Kagoshima University); KITAGUCHI Hitoshi (NIMS)

E-mail: hata@mm.kyushu-u.ac.jp

1. 緒言

講演者らは、電子ビーム蒸着法で種々の MgB_2 薄膜を作製し、超伝導特性と膜の微細構造の関連を調べている。その中で、蒸着時の Mg と B の組成比を化学量論組成 MgB_2 からずらすと、超伝導特性や格子定数が系統的に変化することを見出している¹⁾。本研究では、Mg と B の組成比が微細組織に及ぼす影響を電子顕微鏡観察により検討した。

2. 実験方法

高真空中で 250°C に加熱した Si(001) 単結晶基板上に、電子ビーム蒸着法で Mg と B を供給した。Mg と B の蒸着速度を調整し、仕込み組成の異なる MgB_2 膜 (Mg : B = 1 : 1.68 [Mg-rich] ~ 1 : 3.42 [B-rich]) を作製した。成膜中の膜/基板の温度変動を抑えるために、間欠式で 15nm ずつ 20 回蒸着を繰り返した。成膜後の組織変化を防ぐために、薄膜の最表面に Cu 蒸着を施した。作製した薄膜の一部を硝酸水溶液に溶解し、誘導結合プラズマ分光分析 (ICP) により溶液組成を測定することで薄膜組成を決定した。作製した薄膜について、 J_c 測定、X 線回折、FIB 及び TEM による組織観察を行った。

3. 結果及び考察

Fig.1 に、Mg-rich 条件 (Mg : B = 1 : 1.96) および 2 種類の B-rich 条件 (Mg : B = 1 : 2.38 および 1 : 3.42) で成膜した MgB_2 薄膜断面の電子回折図形 (左)、TEM 明視野像 (中央) および暗視野像 (右) を示す。電子回折図形中に \circ で囲んだ MgB_2 の $hkl = 002$ 反射の角度分布は、B-rich 条件の方が小さい。すなわち、B-rich 条件の方が基板垂直方向への c 軸配向度が高い。明視野像を見ると、Mg-rich 条件では間欠式の膜蒸着に対応すると思われる層状の明暗コントラストが 15nm 程度ごとの間隔で現れており、B-rich 組成ほどそのような層状の周期コントラストは見られなくなる。層状構造の有無と対応す

るように、暗視野像で明るく見える MgB_2 結晶は、Mg-rich 条件では成長途中で細かく分断しているのに対して、B-rich 条件では基板から膜表面まで連続した MgB_2 柱状結晶が成長する傾向がある。EDX 元素マッピング分析の結果、Mg-rich 条件で見られる層状構造は、過剰な未反応 Mg が MgB_2 層間に存在したものであることが示唆された。B-rich 条件での過剰 B の存在形態については現時点で明確な知見を得ていないが、X 線回折実験における格子定数変化¹⁾を参考にすれば、B 過剰組成の MgB_{2+x} 結晶が生成している可能性が考えられる。

更に注目すべき点として、Mg:B 組成比は、膜組織だけでなく、その組織安定性にも顕著な影響を及ぼすことがわかった。Mg-rich 条件では、膜に残存した未反応 Mg が大気と反応することにより MgO の生成、成長が起こり、 MgB_2 膜組織が著しく劣化した。一方、B-rich 条件で作製した薄膜ではそのような組織の劣化は認められなかった。また、 MgB_2 化学量論組成の場合には、Mg-rich 膜に類似する組織劣化が認められた。

これまでの研究¹⁾で、B-rich 化による超伝導特性の著しい低下は見られず、高磁界中での臨界電流密度をむしろ向上させる結果も得られていることから、安定な膜組織が得られる B-rich 条件は、デバイス等への応用上有効な MgB_2 成膜条件になるものと考えられる。

本研究での組織観察は、文部科学省九州地区ナノテクノロジー拠点ネットワーク (九州大学超高压電子顕微鏡室) の支援の下で実施されました。

参考文献

1. T. Doi *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 17 (2007) p. 2899.

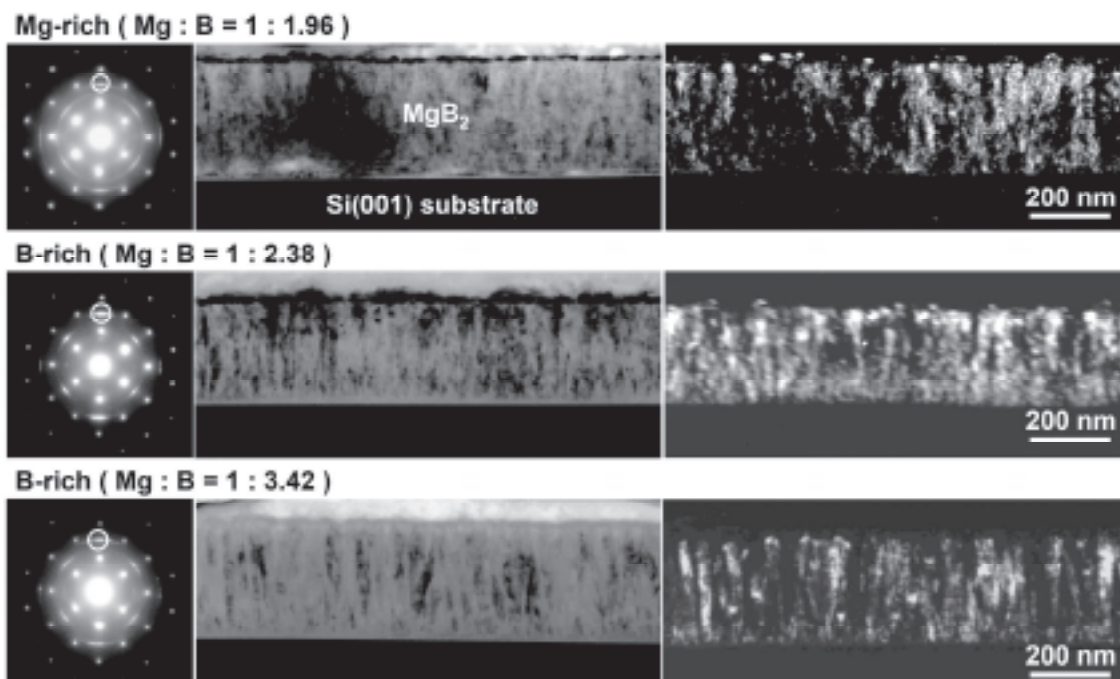


Fig. 1. Cross-sectional diffraction patterns (left), TEM bright-field images (center) and dark-field images (right) of MgB_2 tapes fabricated under different evaporation ratios of Mg and B.

電気化学的手法による $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 膜の室温キャリア制御Carrier control of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ film with an electro chemical method at room temperature

多田大樹、野島勉、中村慎太郎、下谷秀和、岩佐義宏、小林典男(東北大学)

TADA Hiroki, NOJIMA Tsutomu, SHIMOTANI Hidekazu, IWASA Yoshihiro, KOBAYASHI Norio (IMR, Tohoku University)

E-mail:htada@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

近年、 MClO_4 (M: アルカリ金属) / Polyethylene Oxide(PEO)等の電解質を用いた FET 構造による界面キャリア制御法が注目されている[1]。この方法において電解質中のイオン(M^+ , ClO_4^-)は、電気化学反応がない場合、物質表面にゲート電圧による電気 2 重層を形成し、高密度のキャリアを電場誘起する。一方、我々は以前より、銅酸化物超伝導体に対し同様の手法を用いると、むしろ電気化学的な反応が促進され、特に熱処理や元素置換では実現不可能なほど強力な電子ドーピングが可能であることを見出ししてきた。注目すべき点は、室温でこのような強力なドーピングが 1 つの試料を用いて連続的にできることである。

本研究では、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (YBCO)の薄膜試料に対し、この電気化学的な手法を用いることにより、広範囲なキャリア数コントロールを試みた。さらに、これを発展させることで、ホール系の超伝導体である YBCO を電子系超伝導体に変えることを目指した。酸化物超伝導体はキャリアの符号の変更が極めて困難であり、ホールと電子の両方で超伝導が発現することは、超伝導発現機構解明に向けても重要な手がかりとなる。

2. 実験

測定に用いたデバイスの構造を Fig.1 に示す。YBCO 膜(膜厚 50 nm)を $\text{SrTiO}_3(100)$ 基板上に RF スパッタ法で成膜し、フォトリソグラフィ法によって微細加工を行った後、試料上部に Pt 板電極を設置し、全体を MClO_4/PEO (M: K or Cs) 電解質に浸した。300 K において YBCO と Pt 電極間に電圧 $V_g = 1.0$ V を印加し、一定時間後に電気抵抗の温度依存性、100 K におけるホール効果(キャリア密度)を測定することを繰り返した。

3. 結果と考察

Fig.2 に $M = \text{K}$ の場合における(a)様々な経過時間での電気抵抗の温度依存性、(b)ホール係数から見積もったキャリア密度 n の時間変化を示す。開始時の試料として、酸素を著しく減少させた YBCO (heavy underdope) を用意した。これに正の V_g (電子ドーピングに相当) を印加すると、電気抵抗の値は最初、時間経過とともに上昇した。しかし 8 時間以降では減少し始め、78 時間経過すると 300 K の電気抵抗は 2 桁変化した。これに伴い、金属的な温度依存性が 100 K 付近まで観測されるようになった。キャリア数に注目すると、最初、 $n = 1.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の密度を持つホール系だったが、時間経過とともに電子系へと移行し、電子数は $1.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上へ増加し続けているとわかる。

この結果から、電気化学的な手法を用いることで、本来ホール系

の超伝導体である YBCO の電子系への変更が、少なくとも実現できたといえる。

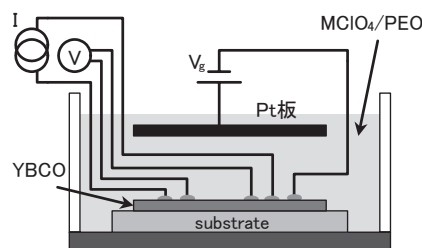
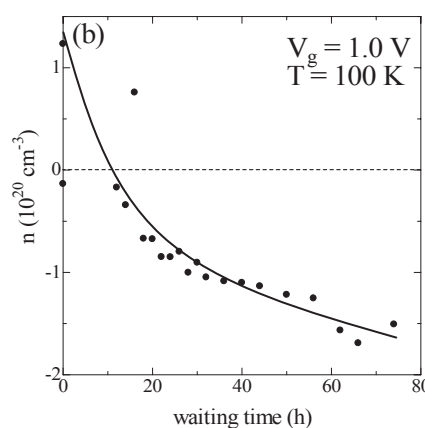
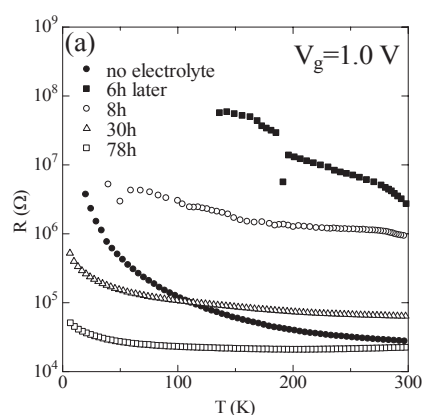


Fig.1 Schematic drawing of sample structure

Fig.2 (a) Temperature dependence of resistance after various waiting time at 300 K with $V_g = 1.0$ V.(b) Plots of carrier density n as a function of waiting time.

参考文献

[1] H.Shimotani et al, Appl.Phys.Lett. 89, 203501 (2006)

超電導フィルタの自動チューニングシステムの開発

Development of an automatic tuning system of an HTS bandpass filter

齋藤敦 大坂真野 金児卓郎 小野哲 大嶋重利 (山形大)

SAITO Atsushi, OSAKA Maya, KANEKO Takuro, ONO Satoshi, OHSHIMA Shigetoshi (Yamagata Univ.)

E-mail: ohshima@yz.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

超電導バンドパスフィルタは低損失、高帯域外遮断特性などのすぐれた機能を有している。その特徴を活かした応用が幾つか提案され、米国や中国では携帯電話の基地局用受信システムとして、日本では気象レーダの雑音除去用として実用化されている。しかしその応用をさらに広げるために、共振周波数シフトが可能なチューニングフィルタの開発が強く望まれている。共振周波数をシフトする手法はいくつか提案されているが、我々は、誘電体板やサファイアロッド・銅ロッドを組み合わせた複合チューニングシステムを新たに提案した。以下に、そのシステムの概要、周波数シフトの実験結果を述べる

2. フィルタのトリミング

自動チューニングシステムを開発するためには、フィルタ特性を改善するトリミング法も併せて検討する必要がある。我々は、すでに、サファイアロッドや銅ロッドを用いることにより、フィルタをトリミングできることを明らかにしている。今回は、そのトリミングを自動化する手法を検討したので以下にその概略を述べる。図1に、フィルタのトリミングのフローチャートを示す。ここで、トリミングライブラリーとは、フィルタの共振器の不適合とフィルタ特性の関係予めシミュレーションにより求めたデータ集である。共振器の長さを変えたとき(シミュレーションでは共振器のCを変える)フィルタ特性がどのように変化するかを求め、ライブラリー化する。フィルタ特性をまず実験的に求め、その結果をトリミングライブラリーと比較し、不都合な共振器を推定する。その情報に基づき、トリミングロッドを移動させ、再

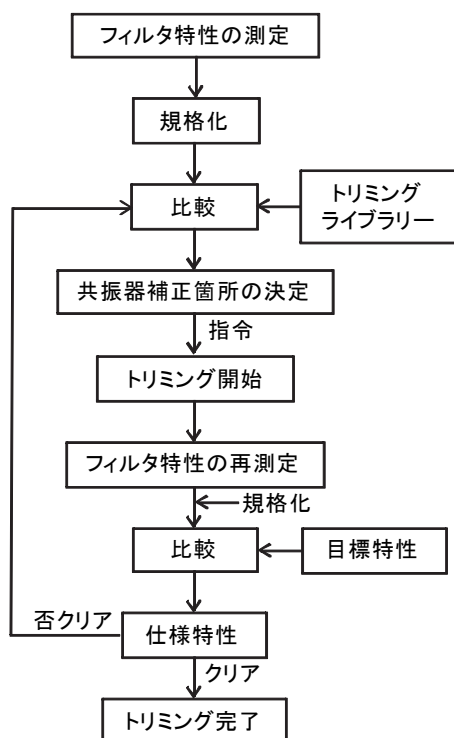


Fig.1. Flow chart of an automatic trimming method

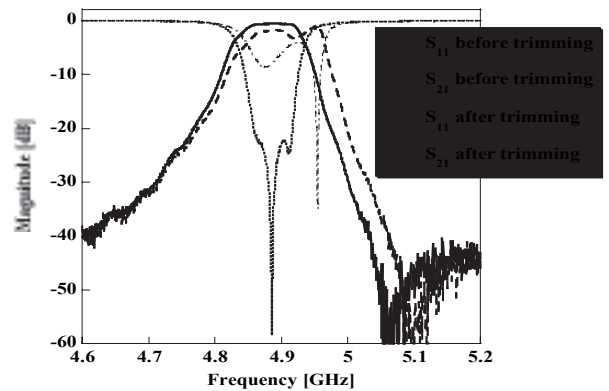


Fig.2. Filter properties before and after trimming.

度測定する。仕様特性を満たまで、繰り返す。図2に、トリミング前と後におけるフィルタ特性の変化を示す。トリミング後はフィルタ特性が回復していることが分かる。

3. フィルタチューニング

フィルタの自動トリミングの目処がついたので、次にチューニングについて検討した。フィルタの共振周波数は、フィルタの上にセットされている誘電体板を移動させることによりシフトさせることができる。フィルタの周波数をシフトさせた後、前節で述べたようにトリミングを行い、フィルタ特性を改善する。図3に、フィルタのチューニング結果を示す。最初 4.99GHzの共振周波数をもっているフィルタを、4.54GHzまでシフトできることが分かる。また、チューニング後のフィルタ特性は、ほとんど劣化していない。このチューニングは、コンピュータにより制御され、4.99GHzから4.54GHzにシフトする時間は1秒以内である。詳しい装置に関しては、当日報告する。

4. まとめ

小型冷凍機に搭載した高温超電導フィルタのチューニング機構を開発し、高速でチューニングできることを明らかにした。現在のフィルタは3段共振器であり、まだ実用化の特性ではない。今後より多段化されたフィルタの自動チューニングを検討する。

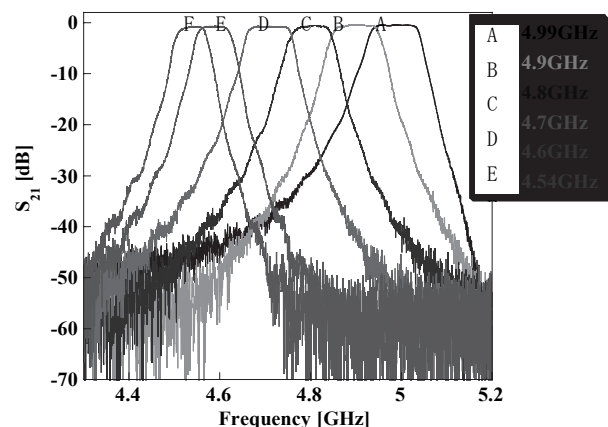


Fig.3. Filter properties before and after tuning

永久磁石による臨界電流密度測定法の数値シミュレーション

Numerical simulation of measurement method for critical current density by using permanent magnet

高山 彰優, 神谷 淳(山形大学); 生野 壮一郎(東京工科大学); 武石 健太(住友電装); 齊藤 敦, 大嶋 重利(山形大学)
 TAKAYAMA Teruo, KAMITANI Atsushi (Yamagata University); IKUNO Soichiro (Tokyo University of Technology);
 TAKEISHI Kenta (Sumitomo Wiring Systems, Ltd.); SAITO Atsushi, OHSHIMA Shigetoshi (Yamagata University)
 E-mail: takayama@yz.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

大嶋等は上下に動く永久磁石が高温超伝導体 (HTS) 薄膜に及ぼす電磁力を測定し、臨界電流密度が最大反発力にほぼ比例することを示した[1]。さらに、彼らはこの実験結果に基づいて、臨界電流密度の非接触測定法を開発した。この方法は永久磁石法と呼ばれる。

本研究の目的は、HTS 薄膜内に流れる遮蔽電流密度の時間発展を解析する数値コードを開発し、同コードを用いて大嶋等の実験結果を再現することである。

2. 遮蔽電流密度解析

本研究では、半径 r_m 、高さ h_m の円柱型磁石を半径 R 、厚み b のディスク型 HTS 薄膜の上方に配置する。さらに、磁石の下面と薄膜表面の距離 L を次のように変化させる。 $L = L_{\max}$ から $L = L_{\min}$ まで一定の速さ $v = (L_{\max} - L_{\min})/\tau_0$ で磁石を薄膜に近づけた後、同じ速さで薄膜から磁石を遠ざける。但し、 L_{\max} と L_{\min} はそれぞれ距離 L の最大値と最小値であり、 τ_0 は最近接時刻である。以下では、中心対称軸を z 軸、薄膜の重心を原点とする円柱座標 (r, θ, z) を採用し、 θ, z 方向の単位ベクトルをそれぞれ e_θ, e_z で表す。

よく知られているように、銅酸化物系 HTS は層状構造をもつため、膜厚方向には遮蔽電流密度はほとんど流れない。本研究では、この性質を反映するため、多薄層近似[2]を導入する。すなわち、HTS 薄膜は M 層で構成され、隣接する 2 層間の界面を横切って遮蔽電流密度は流れないと仮定する。以下では、第 p 層中の遮蔽電流密度と電界をそれぞれ j_p, E_p で表し、1 層の厚みを $2\varepsilon \equiv b/M$ とする。また、永久磁石の強さを表すため、 $L = L_{\min}$ で $(z, r) = (b/2, 0)$ における磁束密度 B_F を与える。

上記仮定の下で、遮蔽電流密度 j_p はスカラー関数 $S_p(r, t)$ によって、 $j_p = (\nabla S_p/\varepsilon) \times e_z$ ($p = 1, 2, \dots, M$) と表され、スカラー関数 $S_p(r, t)$ の時間変化は微積分方程式:

$$\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \left[\sum_{q=1}^M \int_0^R Q_{pq}(r, r') S_q(r', t) r' dr' + \frac{S_p(r, t)}{\varepsilon} \right] + \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{B} \cdot e_z)_p + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r E_p \cdot e_\theta) = 0, \quad (1)$$

に支配される[2]。但し、 μ_0 は真空の透磁率であり、 \mathbf{B} は永久

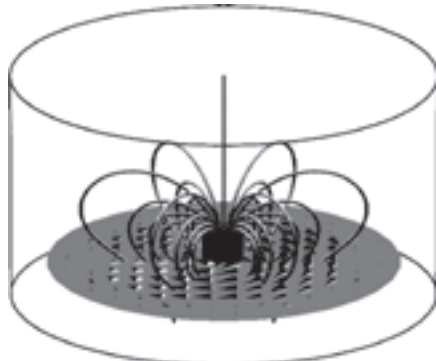


Fig. 1 The spatial distribution of the magnetic flux lines and the shielding current density at time $t = \tau_0$ for the case with $j_C = 3.85 \text{ MA/cm}^2$ and $E_C = 0.1 \text{ mV/m}$.

磁石による生成磁束密度を示す。さらに、 $\langle \rangle_p$ は第 p 層の厚みに関する平均化演算子を表す。

遮蔽電流密度 j_p と電界 E_p には密接な関係があり、その関係は $J-E$ 構成方程式: $E_p = E(|j_p|) j_p / |j_p|$ で表される。本研究では、関数 $E(j)$ としてべき乗モデル: $E(j) = E_C(j/j_C)^N$ を採用する。但し、 E_C 及び j_C はそれぞれ臨界電界及び臨界電流密度であり、 N はパラメタである。

(1)の初期条件及び境界条件には $S_p(r, 0) = S_p(R, t) = 0$ を仮定する。(1)の初期値・境界値問題を解けば、HTS内に流れる遮蔽電流密度の時間発展を調べることができる。

本研究では、(1)の初期値・境界値問題を解くための有限要素コードを開発した。本研究を通して、物理的・幾何学的パラメタを以下の値に固定する: $R = 20 \text{ mm}$, $b = 200 \text{ nm}$, $M = 6$, $N = 16$, $r_m = 2.5 \text{ mm}$, $h_m = 3 \text{ mm}$, $L_{\max} = 20 \text{ mm}$, $L_{\min} = 0.5 \text{ mm}$, $\tau_0 = 39 \text{ s}$, $B_F = 0.3 \text{ T}$ 。

3. 永久磁石法の再現

Fig. 1に時刻 $t = \tau_0$ における磁束線と遮蔽電流密度の空間分布を示す。同図より明らかなように、磁場がHTS薄膜に侵入し、HTS薄膜内の遮蔽電流は時計回りに流れている。また、永久磁石の動作が終了した時刻 $t = 2\tau_0$ で、薄膜内に残留磁束が存在することがわかった。

Fig. 2に臨界電流密度 j_C の最大反発力 F_M/b への依存性を示す。同図より明らかなように、臨界電流密度は最大反発力と比例関係を示し、計算結果は大嶋等の実験結果[1]と定性的に一致している。さらに、臨界電界 $E_C = 10 \text{ mV}$ の場合、数値結果が実験結果に近い値を示した。以上の結果より、永久磁石法が数値シミュレーションによって再現されたといえる。

参考文献

1. S. Ohshima *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.15, no. 2, pp. 2911-2914, Jun. 2005.
2. A. Kamitani *et al.*: IEICE Trans. Electron., vol. E82-C, no. 5, pp. 766-773, May 1999.

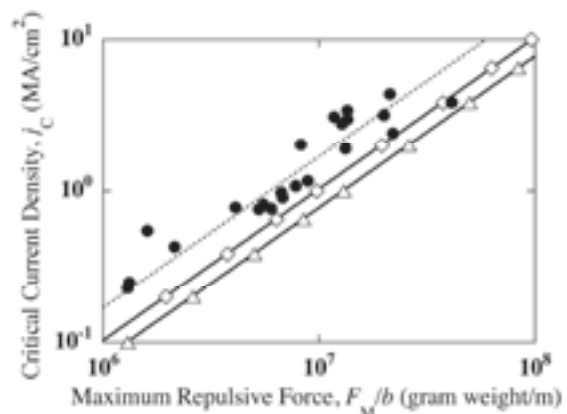


Fig. 2 Dependence of the critical current density j_C on the maximum repulsive force F_M/b . Here, \bullet : Ohshima's experimental data[1], \diamond : $E_C = 10 \text{ mV/m}$, and \triangle : $E_C = 0.1 \text{ mV/m}$.

永久磁石を用いた超電導薄膜の J_c の面内分布測定

Distribution measurement of J_c in superconducting thin film using a permanent magnet

大嶋重利 齊藤敦 高山彰優 神谷淳(山形大) 生野壮一郎(東京工科大) 武石健太(住友電装)
 OHSHIMA Shigetoshi, SAITO Atsushi, TAKAYAMA Teruo, KAMITANI Atsushi (Yamagata Univ.)
 IKUNO Soichiro (Tokyo Univ of Technology) TAKEISHI Kenta (Sumitomo Wiring Systems Ltd.)
 E-mail: ohshima@yz.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

超電導薄膜や超電導テープ線材の臨界電流密度(J_c)を非破壊、非接触で且つ高速に測定できるシステムの開発が強く望まれている。ホール素子法、レーザ走査法及び誘導法などが提案されているが、いずれも一長一短があり、未だどの手法が最も適しているかは定かでない。我々は、永久磁石を用いた新しい J_c 評価法を提案し、報告してきた。今回はその手法を拡張し、薄膜試料の J_c 面内分布を検討したので報告する。

2. 測定の原理と装置の概要

図1で示されるように、永久磁石を超電導薄膜に近づけたり遠ざけたりすると、磁石に反発力や吸引力が生じる。超伝導薄膜と磁石の距離をパラメータにして測定すると図2のような曲線が描かれる。また、距離ゼロに外挿した力 F_M は J_c に比例する。今回は、試料をセットするホルダーを X-Y ステージに載せ、平面的に移動させ、 F_M の2次元分布を測定できるシステムとした。

図3に、測定システムの外観写真を示す。試料ホルダーは、ガラスデューブの中にセットされている。沸騰する窒素ガスが永久磁石に衝突すると測定ノイズとなる。デューブ瓶を用いることにより液体窒素中のバブリングが少なくなり、測定ノイズを低減することができた。

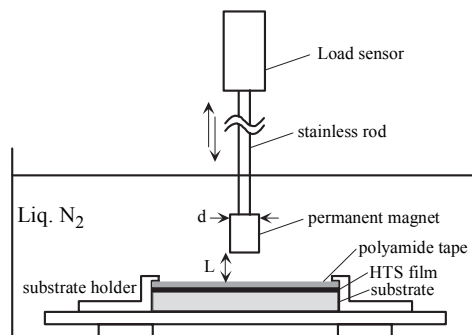


Fig.1. Schematic drawing of J_c measuring method using a permanent magnet.

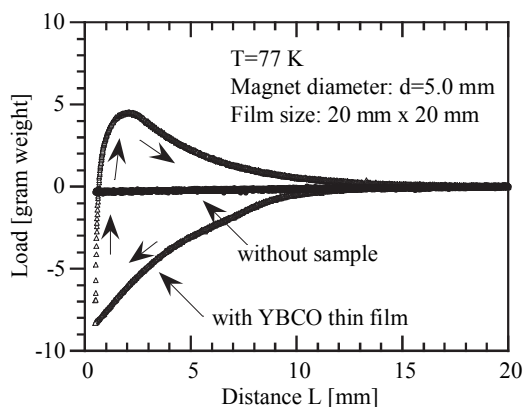


Fig.2. The load vs. distance L curves with and without a HTS sample.

3. 実験結果

図4に、2インチ丸のYBCO薄膜の F_M の面内測定結果を示す。測定は5ミリ間隔の升目で行った。測定データを補完法により、2次元表示している。この結果、薄膜の中央部分はほぼ同じ値となっていることが分かる。また、試料エッジ部分の F_M 値が減少している。これは、薄膜表面に流れるシールド電流が、非対象となり、正確な F_M になっていないためである。

4. まとめ

試料を2次元的に移動できる J_c 評価法を作製し、薄膜面内 J_c 分布の測定が可能であることを明らかにした。しかしながら試料端部の F_M が予想以上に小さくなることが明らかとなった。これは、表面に流れるシールド電流の非対称性に起因しているものと思われる。今後、永久磁石のサイズを変えて測定し、最適なシステムを検討する。

参考文献

1. S.Ohshima, K.Takeishi, A.Saito, M.Mukaida, Y.Takano, T.Nakamura, T.Suzuki, M.Yokoo. IEEE Trans. Appl. Super. 15 (2005) 2911

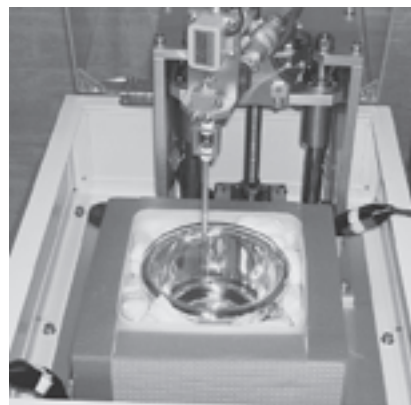


Fig.3. Picture of measuring system

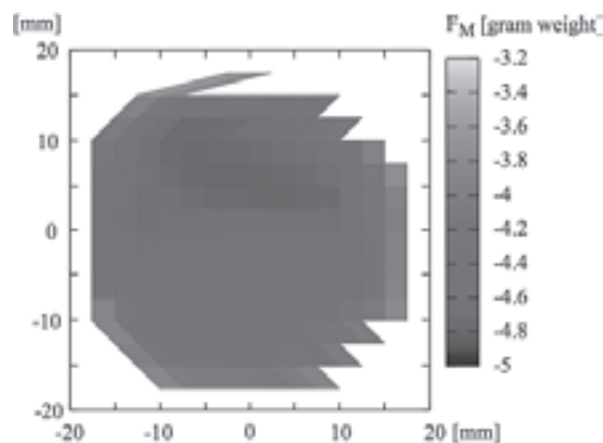


Fig.4. Experimental result of F_M in-plane distribution measured by a permanent magnet method.

らせん導体の電磁気学 Electromagnetic theory of a helical conductor

富中利治 (文科省, 理研, KEK)
TOMINAKA Toshiharu (MEXT, RIKEN, KEK)
E-mail: tominaka@mext.go.jp

1. はじめに

撚られた導体の電磁解析のために, その構成要素であるらせん(ヘリカル)形状の導体の磁場, インダクタンスなどの電磁的な解析計算について検討してきたが, その概要をまとめ, 今後の課題などについて報告する。

2. らせん導体の磁場計算

単層ソレノイドに対応する無限長ヘリカル形状の細い導体(線電流)の磁場, ベクトルポテンシャルは変形ベッセル関数の無限級数として厳密解が求められる[1]. 一般的には, 導体の断面形状を反映した計算には, 変形ベッセル関数の無限級数の面積積分の数値計算が必要になるが, 変形ベッセル関数の無限級数を利用した解析計算は有用であり, 密巻き単層ソレノイドから直線導体まで適用できる解析表式の意義は高いと思う。密巻き単層ソレノイドから直線導体に対応する用語として, らせん(ヘリカル)導体またはらせんコイルのどちらが適切かということが問題になるが, ここでは直線導体に近い非常に疎に巻かれた単層ソレノイドを主に扱うためにらせん導体とした。

3. らせん導体のインダクタンス

ツイストした超伝導複合線の超伝導フィラメント, 撚線の素線(ストランド)などのインダクタンス計算のために, 巻き半径に比べて十分長いらせん(ヘリカル)形状の導体のインダクタンスの解析式が有用になるが, 円環状導体についての公式などから考えると, 特に Fig.1 に示すような長いらせんの細い導体間の相互インダクタンス, 及び円断面のらせん導体の自己インダクタンスなどの解析式を求めることに意義がある。現状, 特に円断面のらせん導体の自己インダクタンスについて複雑な解析式(近似式)は得られているが, 改良すべきものと考えている[2].

4. らせん導体に関する扱い方, 及び従来の研究

従来, 電磁気の教科書に記述された単純なインダクタンスの式は, 撚られた導体の解析には必ずしも適合するものではなく, 誤解を招くものもあったと考えている。一般に, 教科書には Fig.2 に示すようならせん導体あるいは単層ソレノイドの図が描かれているが, 初等的に求められた磁場, インダクタンスの式は, 厳密には, Fig.3 に示すような隙間なく巻かれた薄いらせん形状のテープ導体に対応するものであり, Fig.1 に示すような長いらせんの細い導体間の相互インダクタンスの解析式などから導出できるものであることが明らかになった[2].

マクスウェルの時代以来, 約 100 年前からソレノイドの電磁気学的な研究とも関連して, らせん導体のインダクタンスの研究も行われてきたようであるが, らせん導体を円環状導体の集まりとして近似したものなども多く, 必ずしも非常に疎に巻かれた単層ソレノイドであるピッチの長いらせん導体に有効なものがあるかどうかなど詳細に調査・検討する必要があるように思う。

5. まとめ

らせん(ヘリカル)形状の導体の電磁的な解析計算は, 撚られた超伝導導体の電磁解析に限らず, 電磁気学の基礎事項のひとつとしても重要であり, 密巻き単層ソレノイドから直線導体まで適用できる統一的な形式で, できるだけ単純明快な精度の高い解析式(公式)を求めることは意義があると考えている。

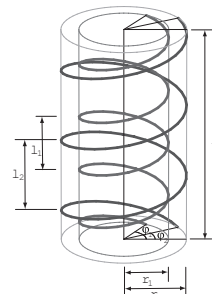


Fig.1. Two coaxial helical conductors of the length of l , the twist pitch length $l_1 (= 2\pi/k_1)$, passing through $(r_1, \phi_1, z=0)$ of the circular cylindrical coordinate, $l_2 (= 2\pi/k_2)$, passing through $(r_2, \phi_2, z=0)$, respectively. In this article, the mutual inductance between two long coaxial helical conductors is discussed only on the condition of $l \gg r_2$.

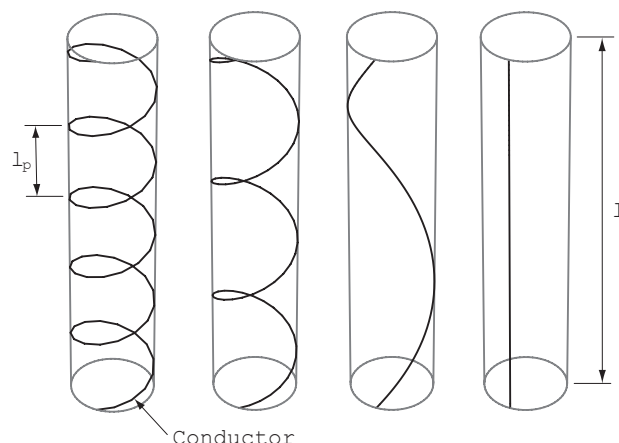


Fig.2. Helical thin conductors with different twist pitches.

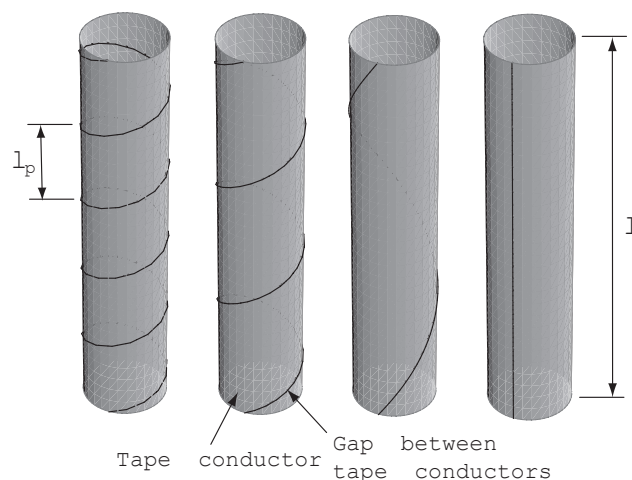


Fig.3. Helical thin tape conductors with different twist pitches.

参考文献

- [1] T. Tominaka, "Magnetic field calculation of an infinitely long solenoid", *Eur. J. Phys.*, vol. 27, pp.1399-1408 (2006).
- [2] T. Tominaka, "Self- and mutual inductances of long coaxial helical conductors", *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 21, 015011(11pp) (2008).

超伝導複合多芯線の回路モデルによる電磁計算

Electromagnetic calculation of a superconducting filamentary composite due to a circuit model

富中利治 (文科省, 理研, KEK)

TOMINAKA Toshiharu (MEXT, RIKEN, KEK)

E-mail: tominaka@mext.go.jp

1. はじめに

超伝導複合多芯線の電磁的な解析は、どのように近似して計算するかによって、連続体モデルによる解析計算、回路モデルなどの種々の計算が行われてきた。インダクタンスなどを考慮した回路モデルによる電流、磁場分布の計算は、超伝導線、撚線の電磁的な解析を統一的に扱うことができ、また導体内部の構造(フィラメント配置)を反映した計算が可能になり標準的な計算手法と考えられる[1]。ここでは、超伝導複合多芯線の回路モデルによる電流、磁場分布の計算について報告する。

2. 通電時、縦磁場印加時の電流分布の計算

通電時、縦磁場印加時の電流分布は、Fig.1 に示すように、超伝導複合多芯線を超伝導フィラメントの並列回路と考えて、らせん(ヘリカル)導体のインダクタンスの解析(近似)式を用いて[2]、インダクタンス行列を求め、通電時には各フィラメントに一樣な通電時の印加電圧、縦磁場印加時には、各フィラメントに縦磁場を発生するコイルにより誘起される電圧を求め、回路方程式を解いて超伝導複合多芯線内の電流分布を計算できる。

縦磁場印加時のシールド電流分布の計算結果を Fig.2 に示す。回路モデルによって、複合多芯線の断面構造(フィラメント配置)を反映した結果が得られることがわかる。この計算では、縦磁場印加時に外側だけでなく、内側のフィラメントも飽和しており、実際の複合線において内側のフィラメントも飽和する可能性があることを示唆している。

3. 横磁場印加時の電流分布の計算

横磁場印加時の電流分布は、フィラメントに誘導されるシールド電流がフィラメントに沿って変化するために、上述のらせん導体のインダクタンスは使用できない。しかしながら通常の複合多芯線のフィラメント配置の対称性は高く、Fig.3 に示すように、複合多芯線の軸に沿って並進対称性をもつ周期的な構造のために、計算を簡単化できる。ここでは、らせんを折れ線近似して、一般に捩じれの位置にある2本の短い直線導体間の相互インダクタンスの解析式を利用して、横磁場印加時の回路方程式のインダクタンス行列、各フィラメントの微小な長さに対して横磁場のコイルによって誘起される電圧を数値計算で求め、回路方程式を解いて電流分布を求めた。横磁場印加時にシールド電流が誘導されることによる磁場分布の計算結果を Fig.4 に示す。ここで、複合多芯線内部の外部コイルによる横磁場に対してフィラメントの誘導電流によるシールドがツイストにより不完全になることを示している。但し、この回路方程式ではツイストが小さく、フィラメント間に誘導される安定化母材を通して流れる電流は小さいとして無視し、回路方程式においてはフィラメントに沿って流れる電流の効果のみを考慮している。

4. まとめ

超伝導複合多芯線の回路モデルによる解析を実際に行って、超伝導線、撚線の電磁的な解析に統一的に扱うことができる回路モデルによる計算手法を検討した。ここではフィラメント間の抵抗の定量的な効果を扱っておらず、今後の課題として、超伝導複合多芯線の回路モデルによる電流分布の時間変化の計算にフィラメント間の抵抗の計算手法の検討が必要になると考えている。

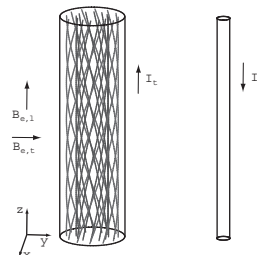


Fig.1. Conceptual circuit used to calculate the current distribution within a twisted filamentary composite.

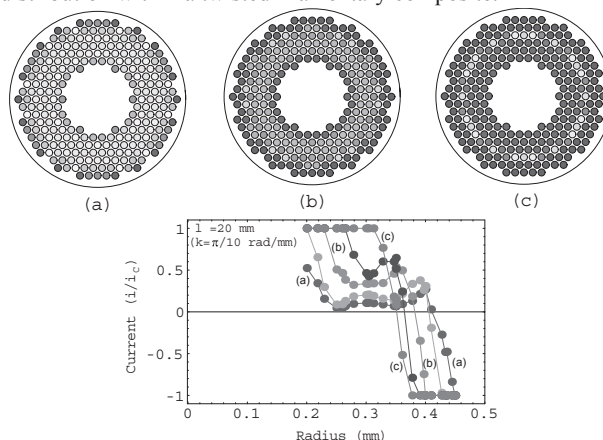


Fig.2. Current distribution among each filament within a composite of conductor diameter 1.0 mm, filament diameter 70 μm , 25 layers with 246 filaments and the twist pitch of $l_p = 20$ mm, under the external longitudinal field.

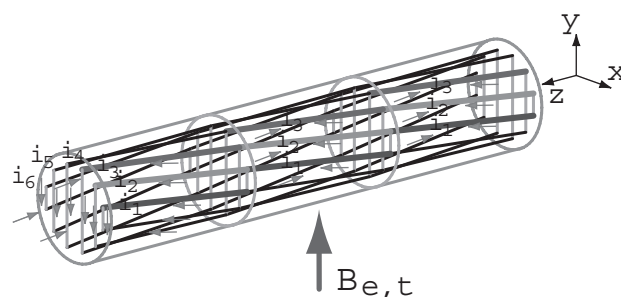


Fig.3. Periodic current distribution among filaments within a long twisted composite in the external transverse field.

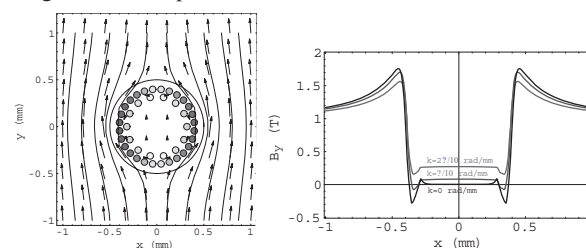


Fig.4. Calculated magnetic field distributions of a filamentary composite of 2 layers with 42 filaments and the twist pitch of $l_p = 20$ mm in the external transverse field.

参考文献

- [1] T. Tominaka, Abstracts of CSJ Conference, Vol.77 (2007) p.222.
 [2] T. Tominaka, "Self- and mutual inductances of long coaxial helical conductors", Supercond. Sci. Technol., vol. 21, 015011(11pp) (2008).

Pt 線を複合化した Dy-123 系超伝導溶融体の微細構造 Microstructure of Dy-123 system superconductor composed Pt wire

島田 浩典, 吉澤 秀二 (明星大); 藤本 浩之 (鉄道総研)

SHIMADA Hironori, YOSHIZAWA shuji (Meisei Univ.); FUJIMOTO Hiroyuki (Railway Technical Research Institute)

E-mail: shimada.00s3059@jcom.home.ne.jp

1. はじめに

希土類 (RE) 系超伝導溶融体は、非超伝導相である Dy-211 の微細分散により、より高い磁場の捕捉が可能である。しかし、高磁場中で冷却を行うと、誘起電流により熱が生じ、マイクロクラックが形成・密集し、最終的には破断に至ることが報告されている。これまで、我々は発熱を直接金属線で外部に逃がすことを目的として、成型する前に Pt 線を複合化して Dy-123 系超伝導溶融体を作製した。その結果、大気中では Pt 線が酸化物相と反応したが、低酸素中では Pt 線の存在を確認できた。本研究では、Pt 線と超伝導相との間にできた中間層の分析を試みた。

2. 作製方法

出発原料として、仮焼粉である Dy-123 と Dy-211 を準備した。これらの仮焼粉を最適なモル比である 1:0.3 に秤量し、有機溶媒中で湿式混合した。さらに、融点降下と機械的強度の向上を目的に Ag_2O を 30 wt% 添加した。混合した粉末を直径 20 mm、高さ 10 mm の円盤状のバルク体にプレス機で成型した。成型する際に、Pt 線を複合化した。複合化した Pt 線は、直径 0.4 mm、長さ 8 mm を用いた。成型したバルク体の下に、バルク体と同様の混合モル比で Dy-123 と Dy-211 を有機溶媒中で湿式混合して、プレス機で成型した敷きバルクを置き、その下にアルミナ基板を置いた。

温度勾配と雰囲気制御を有する雰囲気炉を用いて、溶融凝固後、種付けを行い、単一ドメインの結晶を生成させた。種結晶として、Nd-123 の単結晶を用いた。

作製した溶融体の超伝導評価として捕捉磁場測定、Pt-Rh 線近傍の評価として SEM-EDX および微小領域の XRD を用いた。捕捉磁場は、印加磁場 2.0 T とし、磁場中冷却法を用いて液体窒素中にて行なった。微小領域の XRD は、0.03 mm のコリメーターを用いた。

3. 結果と考察

Fig.1 に作製した溶融体の外観写真、成長したドメインと Pt 線の複合状態の簡略図を示す。作製した 18mm Φ の Dy-123 系超伝導溶融体は、種結晶を中心として、ファセットラインが形成されていて、Pt 線が結晶内に複合化されている事がわかった。しかし、ファセットラインの一部では、完全に端まで至っていない事から、部分的に単一ドメインが成長している事がわかった。

溶融体の捕捉磁場の測定結果について説明する。1.8 T の印加磁場に対して、0.095 T の磁場を捕捉した。磁場の分布は至ってシャープであり、表面において単一ドメインが形成された範囲では、単一ドメインが内部まで成長していることが考えられる。

複合化した Pt 線近傍の存在状態について説明する為に、Fig.2 に SEM 写真を示す。SEM 写真の中央にある灰色の Pt 線の周囲には、3 つの層が花のように形成されていることがわかった。この 3 層は、薄い 2 層が厚い中間相を囲む形で形成している事がわかる。また、Pt 線側の薄い相はほとんど Pt 線と一体化している事から、Pt 線が反応して一部違う元素が混合している事が考えられる。

Fig.3 に微小領域の XRD 測定の結果の一部を示す。そ

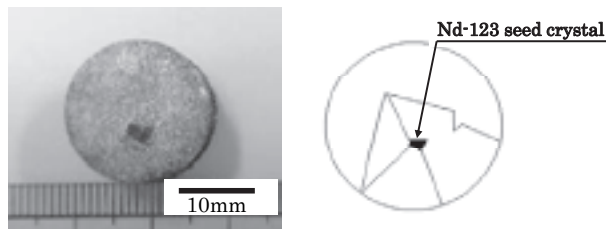


Fig.1 Optical photograph and illustration of the sample

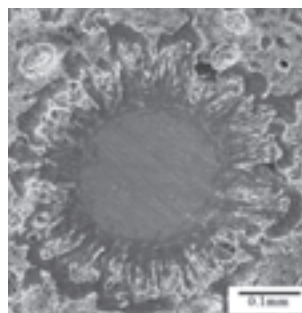


Fig.2 SEM photograph of surroundings of the Pt wire in the sample.

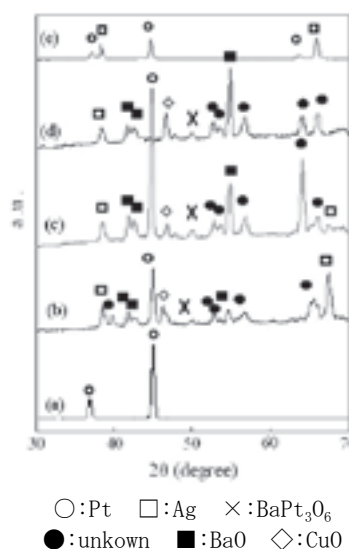


Fig.3 Minute department X-rays diffraction of the intermediate layer

れによると、外側の相(e)では Ag、中間の相(b~d)では BaO、CuO をメインとした Ba, Cu, Ag, Pt の多数の化合物、内側の相(a)では Pt と Ag が存在することがわかった。

参考文献

- (1) 島田 浩典・吉澤 秀二・藤本 浩之：2007 年度秋季低温工学・超伝導学会、講演論文集 P. 159

異なる酸素分圧下で作製した Dy123 バルクの機械的特性

Mechanical properties in Dy123 bulks melt-processed under different oxygen pressure

村上 明, 橋本 良太, 宮田 寛(弘前大); 片桐 一宗(岩手大); 岩本 晃史(核融合研)

MURAKAMI Akira, HASHIMOTO Ryota, MIYATA Hiroshi (Hirosaki Univ.); KATAGIRI Kazumune (Iwate Univ.); IWAMOTO Akifumi (NIFS)

E-mail: amura@mech.hirosaki-u.ac.jp

1. はじめに

酸化物高温超電導バルク材(以下, バルク)の機械的特性の改善・理解は, 強力磁石, 非接触軸受, 大容量電流リードなど, バルクを用いた様々な超電導機器の実用化・高効率化にとって必要不可欠である. 優れた超電導特性と低い熱伝導率を有することから, 特に電流リード用材料として有望な Dy 系バルクは, 高酸素分圧下で作製することで超電導特性の劣化を伴うことなく気孔を減らすことができるため[1], 優れた機械的特性を有するバルクの開発が期待されている. 発表者らのこれまでの研究では, Dy 系バルクを純酸素中で作製して気孔を減らすことで, 実断面積の増加などによる機械的特性の改善が得られたが, バルクに超電導特性を付与するために行われる酸素アニールにより破壊強度は低下した[2]. 一方, 大気中で作製したバルクでは, 酸素アニール後の破壊強度は, 破壊靱性値の上昇と関連して酸素アニール前のそれよりも高かったことから[3], 酸素アニール前後での機械的特性の違いを気孔率に着目して検討することで, バルクの開発にとって有益な情報が得られると予想される. 本研究では, 異なる酸素分圧下(50 および 75 %酸素雰囲気)で作製したバルクの機械的特性を評価し, 酸素アニール前後での機械的特性と気孔率との関係を, これまでに報告した純酸素中および大気中で作製したバルクの結果[1-3]も含めて検討した.

2. 実験方法

新日本製鐵製の Dy 系バルク(直径 30 mm, 厚さ 10 mm)を用いた. 75:25(mol 比)で混合した $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ と $\text{Dy}_2\text{BaCuO}_5$ (以下, Dy211)の粉末に Dy211 粒子微細化のため 0.5 wt%の Pt を添加して成形した前駆体を, 50 および 75 %酸素雰囲気中で 1423 K まで加熱して 1 時間保持した後, 1313 K まで冷却し, Nd123 種結晶を配置して徐冷・結晶成長させたものである. 寸法 $2.8 \times 2.1 \times 24 \text{ mm}^3$ の試験片を, 2.1 mm 方向とバルクの厚さ(c 軸)方向とがほぼ一致するようにバルクから切り出した. 切り出した試験片に対して, 723 K で 100 時間, 酸素アニールを行った. 大気中において, 負荷容量 2 kN のインストロン 4464 万能試験機により, 支点間距離 21 mm の3点曲げ負荷を, 試験片の 2.1 mm 方向に対してクロスヘッド速度 0.1 mm/min で行い, 負荷に伴う試験片の引張側表面中央でのひずみを, ゲージ長さ 0.2 mm のひずみゲージで測定した. 破断した各試験片の側面をラッピングシートで研磨し, 破断部近傍の気孔率(気孔の面積率)を画像解析により評価した.

3. 結果および考察

応力-ひずみ線図の傾きから得たヤング率と作製雰囲気(酸素分圧)との関係を Fig.1 に示す. 図中の実線と破線は, 酸素アニールを施した試験片(Annealed 材)と施していない試験片(As-grown 材)のデータの平均値を表している. ヤング率には, 酸素分圧の上昇に伴い上昇する傾向が見られる. 酸素分圧の上昇に伴い気孔率は低下したことから, 実断面積の増加と関係している. 75 %酸素中で作製したバルクでは, Annealed 材のヤング率は著しく低い. また, 50 %酸素中で作製したバルクでは, Annealed 材のヤング率は As-grown 材のそれよりも高く, 他のバルクの結果と一致しない. これらは, Annealed 材と As-grown 材, 両者の気孔率の違いと関係する

と考えられる.

曲げ強さと作製雰囲気との関係を Fig.2 に示す. 曲げ強さにも酸素分圧の上昇に伴い上昇する傾向が見られる. 気孔の減少に伴う実断面積の増加とともに, き裂と合体してき裂の一部のようにふるまうであろう, き裂先端近傍に存在する気孔が減少したことなどによると考えられる. 大気中で作製したバルクの破壊強度は, 前述のように酸素アニールにより僅かに上昇したが[3], 他のバルクでは低下した.

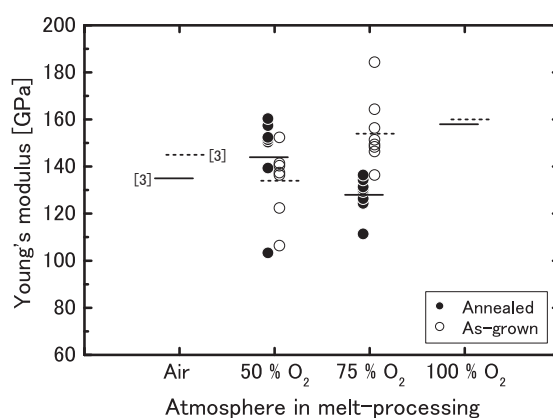


Fig.1 Young's modulus of Dy123 bulks melt-processed under different oxygen pressure.

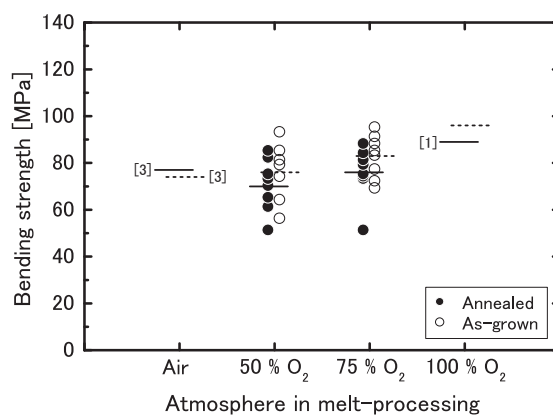


Fig.2 Bending strength of Dy123 bulks melt-processed under different oxygen pressure.

参考文献

1. H. Teshima, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.158.
2. R. Hashimoto, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.111.
3. A. Murakami, et al.: Physica C in press.

YBCO 超電導線材の疲労特性

Fatigue properties of YBCO coated conductors

川井 優季*, 田中 洋輔, 植田 浩史, 石山 敦士 (早大); 飯島 康裕, 齊藤 隆 (フジクラ)
鹿島 直二, 長屋 重夫 (中部電力); 山田 穰, 塩原 融 (ISTEC-SRL)

KAWAI Yuuki, TANAKA Yousuke, UEDA Hiroshi, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);

IIJIMA Yasuhiro, SAITOH Takashi (Fujikura); KASHIMA Naoji, NAGAYA Shigeo (CHUBU Electric Power Co.);

YAMADA Yutaka, SHIOHARA Yuh (ISTEC-SRL)

E-mail :atsushi@waseda.jp

1. はじめに

SMES 用の超電導コイルに YBCO 線材を用いた場合、線材は冷却による圧縮ひずみ (熱ひずみ) だけでなく、周期的な励磁・減磁に伴ってローレンツ力による引張り・圧縮ひずみ (機械ひずみ) を繰り返し受けることになる。従って、線材の超電導特性がひずみによってどのような影響を受けるのかを知っておくことは重要である。そこで我々は YBCO 超電導線材について、ひずみ - I_c 特性およびひずみの繰り返し印加による疲労特性を実験的に調査してきた^[1]。今回引き続き実施したひずみ特性試験と疲労試験について報告する。

2. 実験装置

試料線材の諸元を Table 1 に示す。これまでの疲労試験では IBAD/PLD 法線材に 0.3%、0.4%、0.5% のひずみを繰り返し 5000 回印加したが劣化は見られなかった。今回は IBAD/MOCVD 法線材を用いた。また実験装置の概略図を Fig. 1 に示す。試料線材は stainless steel (SUS304) 製の U 字型の治具底面に半田付けされている。ステッピングモータで a 点を上下に動かすことによって、線材長手方向にひずみが印加される仕組みとなっている。

3. 実験方法

実験は液体窒素浸漬冷却、自己磁場下で行い、ひずみは線材が単体で冷却されたときのひずみを基準とした。

始めに、 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 基準でひずみを加えない状態で I_c を測定し、これを I_{c0} とした。次に、線材にひずみ ε を印加し、この状態で I_c 測定を行った。そしてこのひずみを除去せずさらに大きくして、再び I_c 測定を行った。この作業を、ひずみを大きくしながら繰り返し行い、ひずみと I_c の関係 ($I_c/I_{c0} - \varepsilon$ 特性) を求めた (ひずみ特性試験)。

そして、ひずみ ε_{max} を線材に対して繰り返し印加し ($\varepsilon = 0 \rightarrow \varepsilon = \varepsilon_{\text{max}} \rightarrow \varepsilon = 0$) というサイクルを繰り返す、 $I-V$ 特性の変化を測定・評価した (疲労試験)。

4. 実験結果

ひずみ特性試験では印加したひずみと冷却による熱ひずみが相殺されて $\varepsilon = 0$ となった時点で I_c がピークを迎え、その後 I_c は単調に低下していく傾向が見られた。この結果を Fig. 2 に示す。

疲労試験では、0.6% のひずみを 10000 回印加したが、 I_c の劣化は見られなかった。この結果を Fig. 3 に示す。

5. まとめ

疲労試験において IBAD/MOCVD 法線材に 10000 回繰り返しひずみを印加したが劣化が見られなかった。発表当日は IBAD/PLD 法線材の結果を交えて報告する。また、今後は IBAD/MOCVD 法で作成された銅複合線材についても疲労試験を行っていく予定である。

Table 1. Specifications of YBCO sample tapes

Process		IBAD/MOCVD
Length		100mm
Width		3.3mm
Thickness	Ag	20 μm
	YBCO	0.8 μm
	CeO ₂	0.35 μm
	GZO	1.1 μm
Hastelloy		100 μm

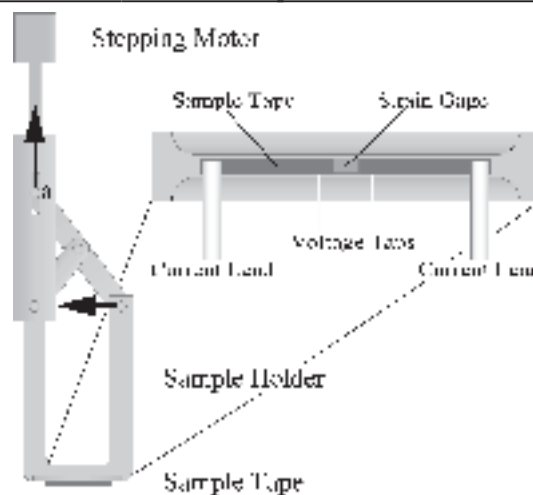


Fig. 1. Experimental apparatus

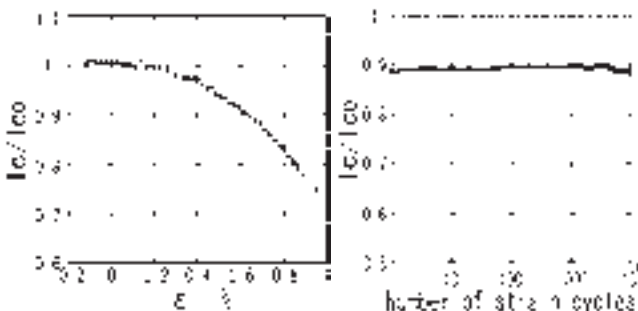


Fig. 2. $I_c/I_{c0} - \varepsilon$ relation

Fig. 3. Fatigue properties of YBCO coated conductors

なお本研究は、超電導応用基盤技術研究体の研究として新エネルギー産業技術総合開発機構の委託により実施したものである。

文献

- [1] 石山敦士, 田中洋輔 他: 2007 年 電気学会全国大会講演概要集 [5], p.26

長期使用したバルク超電導体の特性評価

Evaluation of the superconducting performance through bulk superconductor used at a long term

富田 優, 福本 祐介, 鈴木 賢次(鉄道総研)

TOMITA Masaru, FUKUMOTO Yusuke, SUZUKI Kenji (Railway Technical Research Institute)

E-mail: tomita@rtri.or.jp

1. はじめに

バルク超電導体は、繰り返し着磁による捕捉磁場について、その着磁回数により特性が劣化していくことが知られており、その対策として樹脂含浸による強化法等が報告されている¹⁾。

しかしながら、これまでの研究では、バルク超電導体の磁場特性について、短い期間での繰り返し着磁や冷却、力学的な負荷による劣化現象等は報告されているものの、バルク超電導体の長期間の使用における磁場特性の変化については、示されていないのが実状である。

そこで、長期間使用されたバルク超電導体の経年劣化について評価するため、捕捉磁場分布を測定し、初期の磁場分布と比較した。

2. 測定試料および方法

測定試料として、日本科学未来館の展示品である「みらい CAN マグレブ(磁気浮上の列車模型)」に組み込まれたバルク超電導体を使用した。溶融法によって製作したイットリウム系酸化物超電導体で、使用期間は約 6 年である。展示模型は、クライオスタット内にあるバルク超電導体を液体窒素による浸漬冷却によって冷却し、対向側のネオジ磁石から得られる磁界によって、安定的に浮上している。

測定方法は、バルク超電導体について、磁場中冷却(外部磁界 2T、液体窒素による浸漬冷却)により磁場を捕捉させ、外部磁界を除去したのち、ホール素子を用いて表面の磁場分布を測定した。

3. 測定結果

Table1.にクライオスタットに組み込まれている計4個のバルク超電導体の捕捉磁場を示す。いずれも、約 50%前後の捕捉磁場の低下が見られた。

Fig1.に、製作した初期の捕捉磁場分布(新日鉄測定)を示し、Fig2. に約 6 年間使用した後の捕捉磁場分布を示す。磁場分布は基本的に初期分布の線形を残しながら、磁場が低下したことを確認した。また、初期に磁場分布に歪みのあるバルク超電導体は、長期使用によってその歪みが強調されていくことを確認した。

今後は、さらにこの捕捉磁場の経年劣化の原因について追求していく。

4. 謝辞

(独) 科学技術振興機構理事長の北澤宏一先生に、ご指導と多大なるご支援を頂きました。また、試料を提供し、研究にご協力いただいた日本科学未来館の竹内恵様、他皆様に感謝致します。

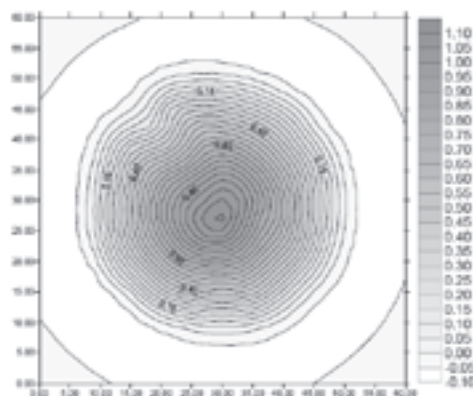


Fig1. The trapped field distribution in 2002

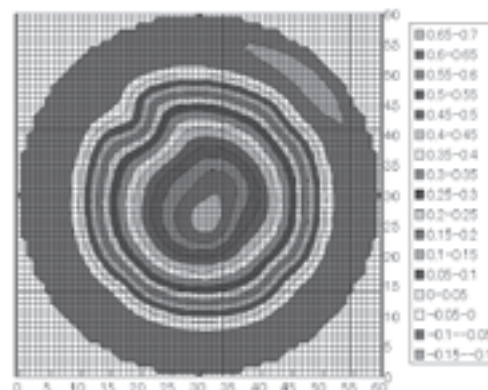


Fig2. The trapped field distribution in 2008

Table1. Peak field of bulk superconductors

Bulk No.	Before	After	Ratio
1811	1.00T	0.55T	55%
1812	1.00T	0.50T	50%
1813	0.85T	0.40T	47%
1814	1.10T	0.65T	59%

参考文献

1. M. Tomita, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 60 (1999) p.216

局所的劣化のある高温超伝導線材の交流通電損失非接触測定

AC transport current loss measure in HTS tape with local damage using a pickup loop method

丸子敦, 田中寛, 濱田貴子, 小川純, 福井聡, 岡徹雄, 佐藤孝雄 (新潟大学)
 MARUKO Atsushi, TANAKA Hiroshi, HAMADA Taka ko, OGAWA Jun, FUKUI Satoshi, OKA Tetsuo,
 SATO Takao (Niigata University)
 E-mail: ogawa@eng.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導線材はその特性向上に伴い、電力ケーブル、限流器、変圧器などの交流電力機器への応用が期待されている。線材の製品化にあたり、実用上最も問題となる交流損失を線材の特性を変えずに評価することが重要である。交流損失には交流通電を行うことにより生じる交流通電損失と交流外部磁界を印加することにより生じる磁化損失がある。磁化損失はピックアップコイルを用いた磁化法により電気的な接続が無く連続測定が可能である。これに対し、交流通電損失測定法は四端子法による測定が一般的であり、線材に半田付けを行う必要がある。この方法では線材に半田が残るのに加え、連続的に線材の評価を行うことができない。そこで、非接触で連続的に交流通電損失を測定可能なシステムを開発する必要がある。このような背景から我々グループは、ピックアップループを用い、交流損失による磁束変化を非接触で測定する方法を提案している。ピックアップループにより得られた信号に、線材とピックアップループの形状で決定される固有の補正係数を用いて補正を行うことにより交流通電損失を導出する。これまでの研究で理想的なピックアップループはスパイラル形状で線材表面に可能な限り近いことが最適設計であることを数値実験により導き出し報告を行った^[1,2]。本研究は実験により、Bi2223/Ag 線材を部分的に劣化させた線材の臨界電流値とピックアップループによって非接触測定された交流損失の関係性について測定を行い、交流通電損失非接触測定が可能であることを示した。

2. 実験方法

本研究では高温超伝導線材として、幅 3.7mm、厚さ 0.26mm、全長 150mm、臨界電流値が約 60A の Bi2223/Ag 線材を用いた。Fig.1 に示すように実際の測定区間は 80mm とし、線材中心からの距離を X とすると、 $X = -15 \sim 15$ mm 区間に対し常温で圧迫を施し線材を劣化させた。スパイラルピックアップループは測定区間が 20mm、線材表面からリターンの位置が 0.5mm とし、液体窒素中で測定区間を移動できるように配置した。実験時は、一定電流を流した状態でピックアップループを移動させて測定を行った。実験時の補正係数は、Fig.1 に示すように $X = -30$ mm の条件でスパイラルピックアップループと同区間を

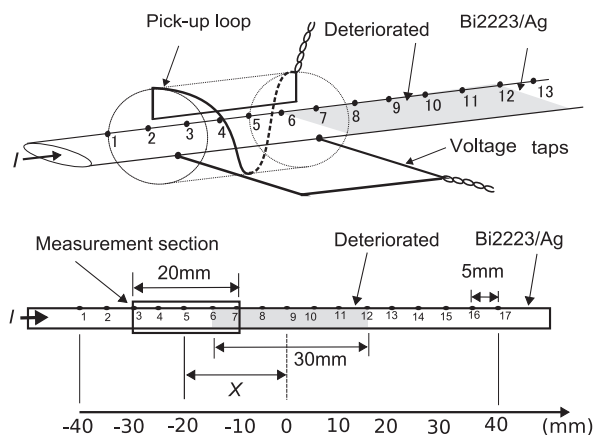


Fig. 1 Schematic illustration of the arrangement of Bi2223/Ag sheathed tape and pick-up loop

四端子法により矩形電圧リードループにより測定を行い、これらの電圧比から補正係数が 1.34 であることを導出した。また、臨界電流値を求めるために Fig.1 に示すように線材端部に 5mm 間隔で電圧タップを配置した。臨界電流値の定義を $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ とすると、各電圧タップ間が 5mm であるため $0.5 \mu\text{V}$ を測定しなければならず困難であったため、電圧が $5 \mu\text{V} \sim 20 \mu\text{V}/\text{cm}$ 生じる区間から n 値モデルによりフィッティングを行い $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ となる電流値を臨界電流値とした。

3. 実験方法及び実験結果

Fig.2 にピーク電流値 25A を通電したとき、線材各所における非接触測定により測定された交流通電損失と臨界電流値を示す。また、測定された臨界電流値を基にノリスの楕円モデルより導出した交流損失を実線で示す^[3]。Fig.2 より 20~50mm の圧迫を加えた区間の臨界電流値が他の区間に比べ低下していることがわかる。これに対し、ピックアップループより測定された交流通電損失は増加しており、臨界電流値が低くなれば交流通電損失が増加するという関係性が見られる。また、ノリスの楕円モデルより導出した値とほぼ一致していることから測定結果は妥当であるといえる。

以上の結果より、ピックアップループを用いた交流通電損失の非接触測定が可能であり、線材長手方向に局所的に劣化した線材において十分に測定可能であることが実験的に証明された。今後、断面形状の異なる線材に対し交流通電損失の非接触測定を行う予定である。

参考文献

1. J. Ogawa, et al.: Physica C, Vol. 463-465 (2007) pp. 1159-1162
2. T. Hamada, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.215
3. W. T. Norris: J Phys D3, (1970) pp. 489-507

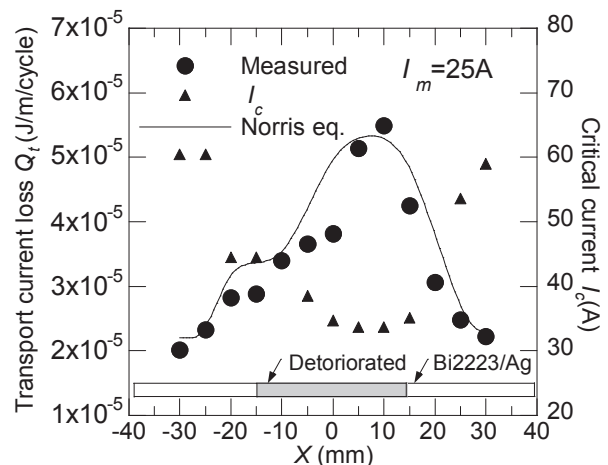


Fig. 2 The experimental result of the critical current, AC transport current loss measured by the pick-up loop method and calculated using the Norris ellipse model.

人口ピン REBCO テープ線材における交流損失の温度スケーリング

Temperature scaling of ac loss in REBCO superconducting tapes with artificial pinning centers

柳田 治寛, 末吉 貴洋, 岩熊 成卓, 船木 和夫(九大);

斉藤 隆, 飯島 康裕(フジクラ); 和泉 輝郎, 山田 穰, 塩原 融(SRL)

YANAGITA Haruo, SUEYOSHI Takahiro, IWAKUMA Masataka, FUNAKI Kazuo (Kyushu University);

SAITO Takashi, IJIMA Yasuhiro (Fujikura Ltd.); IZUMI Teruo, YAMADA Yutaka, SHIOHARA Yuu, (SRL)

E-mail : yanagita@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

超電導線材を電力機器応用する場合、超電導巻線部において発生する交流損失は全熱負荷の大半を占めるため、これを見積もることは重要である。また、今後の線材開発の一助のためにもその電磁特性などを評価することが必要である。

我々はこれまで、YBCO テープ線材の交流損失特性を評価し、温度スケーリング則が成立することを確認している。今回、磁界中での臨界電流特性の向上を目的に人口ピンを導入した GdBCO テープ線材について磁界印加角度 90° の場合において、交流損失特性、臨界電流特性を測定し、温度スケーリング則が適用可能かを調べたので報告する。

2. 試料線材及び実験方法

試料は PLD 法によって GdBCO 超伝導層を成膜させる際に、ターゲットに ZrO_2 を混入させることで、人口ピンを含ませた GdBCO 線材である。諸元を table.1 に示す。この短尺線材を 3 枚積層して、鞍型ピックアップコイル法により、冷凍機による伝導冷却で 35~77K の範囲で、磁化及び交流損失を測定した。磁界は試料幅広面に対して垂直に印加した。

Width(mm)		10
Length(mm)		60
Thickness(μ m)	Ag	20
	GdBCO(+ZrO ₂)	1.1
	CeO ₂	0.4
	GZO	0.8
	Hastelloy	100

Table.1 Specificatopms of GdBCO(+ZrO₂) tapes

3. 測定結果

人口ピンを導入した GdBCO 線材の交流損失の測定結果を Fig.1 に示す。中心到達磁界より十分大きな磁界振幅に対して測定した磁化の値は臨界電流 $I_c(B)$ に比例する。よって、 $I_c(B)$ は測定した磁化曲線から算出可能である。これまでの、YBCO 線材の臨界電流特性は、各温度の零磁場の臨界電流 (以下、 $I_c(0, T)$) で規格化することにより温度に関してスケーリングされ、また、交流損失も温度に関してスケーリングされることを確認している。そこで、Fig.1 に示す交流損失を $I_c(0, T)$ の臨界電流で規格化してみた。結果を Fig.2 に示す。横軸は $I_c(0, T)$ 、縦軸は $I_c(0, T)$ の 2 乗値で規格化している。各温度における交流損失曲線が一つのマスターカーブに一致し、温度でスケーリングされることを確認した。また、測定時に得られる磁化曲線から算出した J_c -B 特性について人口ピンを導入していない GdBCO 線材と比較したものを Fig.3 に示す。高磁界領域において臨界電流密度が向上していることがわかる。特に、両曲線の折れ曲がり点よりも高磁界側での臨界電流密度の減衰率が小さくなっていることがわかる。

以上の結果より、磁界印加角度 90° の各温度において GdBCO 超伝導層に ZrO_2 を導入することによる特性向上が鞍型ピックアップコイル法による測定結果でも確認でき、また温度スケーリング則が適用可能であることが確認できた。

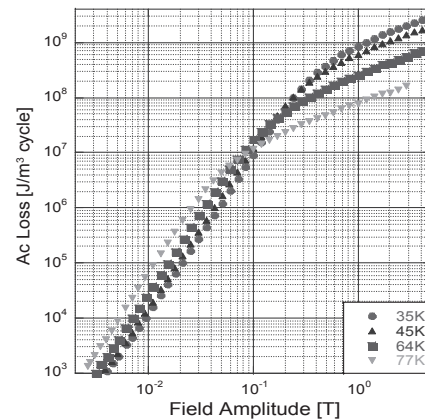


Fig.1 Temperature dependence of ac losses. (perpendicular magnetic field in the case of $\theta = 90^\circ$ at 35.45.64 and 77K.)

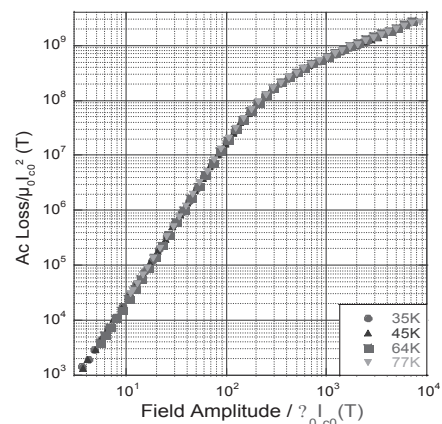


Fig.2 The normalized ac losses by $I_c(0, T)$.

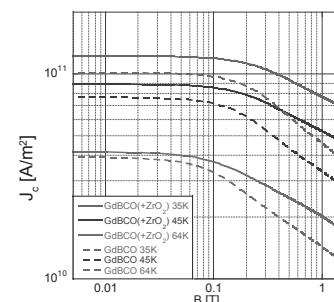


Fig.3 Comparison of Jc-B characteristics GdBCO doped ZrO₂ tapes and not doped GdBCO tapes. (Estimated the magnetization curves observed)

本研究は、超伝導応用基板技術研究開発の一環として、ISTEC を通じて NEDO の委託を受けて実施しているものである。

3 層 3 並列配置高温超伝導集合導体中の交流電損失の通電方向による影響 Influence of transport current direction on HTS assembled conductor

高橋 謙太郎, 八代 保, 新海 一也, 久米 宗太, 小川 純, 福井 聡, 岡 徹雄, 佐藤 孝雄(新潟大学)

TAKAHASHI Kentaro, YASHIRO Tamotsu, SHINKAI Kazuya, KUME Sota, OGAWA Jun, FUKUI Satoshi, OKA Tetsuo, SATO Takao (Niigata University)
E-mail: ogawa@eng.niigata-u.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導ケーブルや変圧器等の交流超伝導電力機器の研究・開発が世界各国で行われており、高温超伝導における交流応用の実現に向けた期待が高まっている。交流電力機器を構成する高温超伝導線材は交流電磁環境下において交流損失を生じ、電力機器全体の特性に直接影響する。現在、高温超伝導線材を3本平面・積層配置したときの交流損失特性は実験・解析により定量的に評価されている^[1,2]。この結果より、同方向通電時には平面配置において中央の線材の交流損失が減少し、交互方向通電時には増加する。積層配置では同方向通電時には増加し、交互方向通電時には減少する。この理由は、線材配置により磁束の侵入長が変わるためであり、数値実験結果とも一致する。本研究は3本平面配置した集合導体を3層に積層した3層3並列集合導体の様々な通電条件における各線材の交流損失を測定し、各通電条件が立体配置中の交流損失に及ぼす影響について定量的な評価を行った。

2. 実験方法

本研究は、臨界電流値 I_c が 59.3~63.2A の Bi2223/Ag 線材を用いた。Fig.1 に示すように、それぞれの線材間隔が上下左右 2mm となるように3層3並列配置高温超伝導集合導体を作成し、熱的測定法を用い集合導体を構成する各線材の交流損失を評価した。測定区間は発泡スチロールにより断熱を施し、線材表面に配置した熱電対により損失発生から30秒後の温度上昇を測定した。各線材は電気的に独立しており組み合わせを替えることにより各線材の通電方向を変えることが可能な構成になっている。

3. 実験結果および検討

Fig.2 に各通電条件における集合導体全体に生じる交流電損失を示す。この図は縦軸に1サイクルあたりの通電損失を臨界電流値の2乗で規格化した値 Q_t (J/m/cycle/ I_c^2)、横軸を電流値の波高値 I_m を臨界電流値で規格化した値を示している。通電条件は Fig.3 に示すように、単独(Single)・直列(Parallel)・交互(Anti-parallel1)・横同方向縦交互方向(Anti-parallel2)・縦同方向横交互方向(Anti-parallel3)通電の5パターンで実験を行った。各線材に単独通電したときに生じる交流電損失の総和を実線、それぞれの電流条件をプロットで

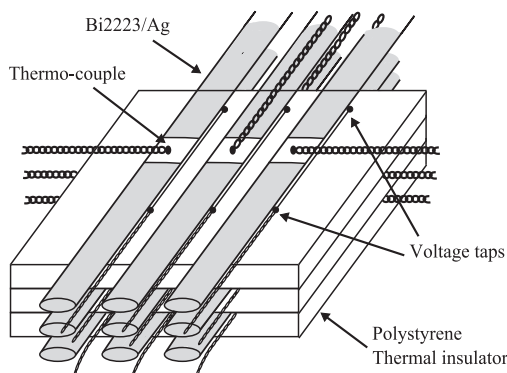


Fig. 1 Schematic illustration of the arrangement HTS assembled conductor

表している。

Fig.2 よりすべての電流条件で、交流電損失は電流値に対し3乗の特性を示している。交互通電時には、交流電損失が単独通電時に比べわずかに減少している。これに対し直列通電時と縦同方向横交互通電時には単独通電時に比べ交流電損失が大きく増加している。また、横同方向縦交互方向通電時にはわずかに増加している。交流損失特性を決定する要因として前述したように、磁束の侵入長が影響し線材の幅広面から磁束が侵入することにより損失は減少する。交互通電の場合には集合導体内で相互に磁界を打ち消す配置であり集合導体全体として損失が減少したと考えられる。これに対し、直列通電時には線材全体に生じる磁界が最大となることから、中央の線材以外の損失が増加したことによる影響が大きいことが予想される。また、横同方向縦交互方向通電は中央の層で損失が減少するが他で損失が上昇するため、集合導体全体としての低減効果が期待できない。また、縦同方向横交互方向は集合導体内の線材横方向からの磁界を打ち消しにくい構造であるため損失が大きくなったことが予想される。

参考文献

1. S. Kume, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.75
2. K. Shinkai, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.216

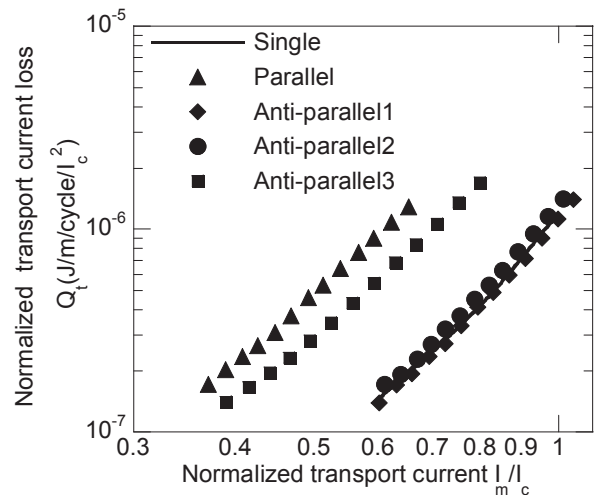


Fig.2 AC transport current loss in assembled conductor with different transport current direction

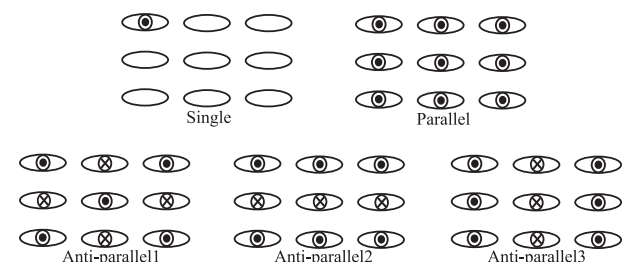


Fig.3 Arrangement of the transport current direction

YBCO コート線材における永久電流の緩和特性の超伝導膜厚依存性

Superconducting layer thickness dependence of relaxation properties of persistent current in YBCO coated conductor.

松谷 文也, 姫木 携造, 木内 勝, 小田部 荘司, 松下 照男(九工大);

宮田 成紀, 衣斐 顕, 山田 穰, 塩原 融(超電導工学研究所)

MATSUTANI Fumiya, HIMEKI Keizo, KIUCHI Masaru, OTABE Edmund Soji, MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.);

MIYATA Seiki, IBI Akira, YAMADA Yutaka, SHIOHARA Yuh (SRL)

E-mail : matutani@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

1.はじめに 現在,IBAD/PLD法で作製されたYBCOコート線材については,低温・高磁界における応用の一つとして超伝導磁気エネルギー貯蔵(SMES)が期待されている。ここで高磁界側での臨界電流密度 J_c ,つまり不可逆磁界 B_i を向上させるには,超伝導層を厚くすることが有効であることが知られている¹⁾。一方,低磁界側では膜厚の厚い試料は超伝導組織の劣化が見られることから,薄い試料において J_c が高くなることが知られている。このようにYBCOコート線材における膜厚依存性はとても複雑である。ここでは,応用に適した超伝導層の厚さを調査するため,膜厚が異なるYBCOコート線材試料の永久電流の緩和特性を評価し,見かけのピンポテンシャル U_0^* の評価を行った。

2.実験 今回使用した試料は,IBAD/PLD法により作製された超伝導膜厚の異なるYBCOコート線材である。Table1に試料の諸元を示している。臨界電流密度 J_c と磁化緩和率を評価するために,SQUID磁力計により広い温度範囲で直流磁化緩和の測定を行った。測定の際に,磁界は c 軸に対して平行に印加した。不可逆磁界 B_i は J_c が $1.0 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ に減少した磁界により決定した。

Table1: Specification of specimens

specimen	thickness	d (μm)	T_c (K)
#1	0.25		88.6
#2	0.50		90.1
#3	0.75		88.2
#4	1.00		87.0

3.結果及び検討 Fig.1に各試料の60 Kにおける磁化の緩和特性を示す。ここで M_0 は $t = 10^2 - 10^3$ sから $t = 1$ sまで外挿したときの磁化 M の値である。Fig. 1より超伝導層の薄い試料は,厚い試料に比べて緩和率が大きく,特性が悪いことが分かる。これは高温領域において,膜厚の薄い試料は磁束クリープの影響を受けやすいためである。これより超伝導層の厚い試料のほうが,高温領域において緩和特性はよいと考えられる。

次に $U_0^* = -k_B T [d(M/M_0)/d \log t]^{-1}$ の関係より,磁化の緩和率から導いた見かけのピンポテンシャル U_0^* の結果をFig. 2に示す。Fig.2より各試料を比較すると,低温側では U_0^* の値はあまり超伝導層の厚さに依存しないが,高温領域では超伝導層の厚さ増加に伴い U_0^* が増加しているのが見受けられる。低温側では,3次元ピンニング状態であると考えられ, U_0^* は超伝導層の厚さに依存せず,ピンニングの強さのみ依存すると予想される。一方,中・高温領域では2次元ピンニング状態になって,ピンポテンシャルが超伝導層の厚さに制限されるということから,超伝導層が厚い試料ほど U_0^* の値が大きくなっている。

解析についてはピン力の分布を考慮した,磁束クリープ・フローモデルを用いて E - J 特性の実験値と理論値をフィッティングさせ,ピンニング・パラメータを抽出した。導出し

た U_0^* の理論値と実験値の比較を行った結果,磁束クリープ・フローモデルにより,おおよそ説明することができた。以上の結果より,見かけのピンポテンシャル U_0^* を向上させるためには,低温領域では3次元ピンニング状態であるため, U_0^* が超伝導層の厚さに依存しないことから, J_c が高いことが望ましく,ピン力の増加が効果的であると考えられる。また,高温領域では2次元ピンニング状態であると考えられるため,縦方向のピンニング相関距離が厚さに制限され,この影響が最も大きいことから,超伝導層の厚さを増加させることが有効であると考えられる。

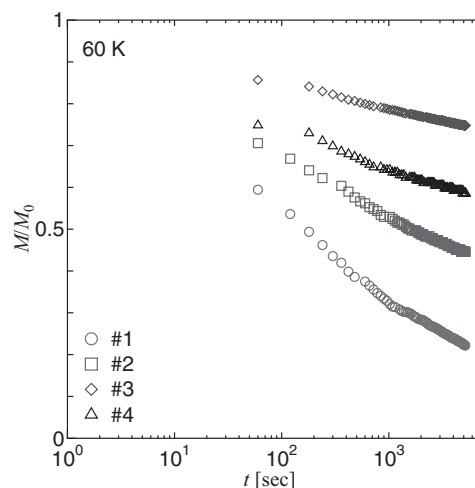


Fig.1 : Relaxation of magnetization at 60 K at 1 T.

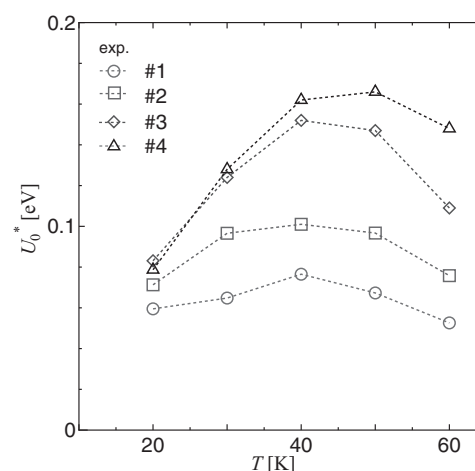


Fig.2 : Temperature dependence of apparent pinning potential at 1 T.

参考文献 1) 姫木ら : 第 76 回低温工学・超伝導学会講演概要集 2P-p09

謝辞 本研究は,超電導応用基盤技術開発の一環として,ISTECを通じてNEDOからの委託を受けて実施したものである。

高温超伝導線材の通電特性評価に向けた走査型ホール素子磁気顕微鏡の開発

Development of scanning Hall-probe microscope for the analysis of current transport in HTS tapes

阿比留健志, 本田貴裕, 井上昌睦, 木須隆暢(九州大学大学院システム情報科学府); 飯島康弘, 柿本一臣, 斉藤隆(フジクラ); 加藤順子, 筑本知子, 中尾公一, 塩原融(超電導工学研究所)

ABIRU Kenji, HONDA Yoshihiro, INOUE Masayoshi, KISS Takanobu (Grad. School of ISEE, Kyushu Univ.);

IJIMA Yasuhiro, KAKIMOTO Kazuomi, SAITO Takashi (Fujikura Ltd.);

KATO Junko, CHIKUMOTO Noriko, NAKAO Koichi, SHIOHARA Yuh (SRL)

E-mail: k_abiru@super.ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

近年、高 I_c かつ長尺のRE123高温超伝導線材が得られるに至り、各種応用機器への適用が検討されている。実用化に向けた更なる特性向上のためには、線材の電流輸送特性を電流分布から評価し、電流の均一性及び電流阻害因子を明らかにすることが有効である。本研究では、高温超伝導線材内の電流分布を定量的に評価するために構築した走査型ホール素子磁気顕微鏡システムを紹介すると共に、RE123テープ線材の空間不均一性や、マルチフィラメント構造をはじめとする加工線材の評価例について報告する。

2. システム構成

走査型ホール素子磁気顕微鏡システムを Fig.1 に示す。試料の冷却は伝導冷却方式を採用しており、液体窒素を貯めたクライオスタット上に窒化アルミステージを乗せ、その上に試料をマウントすることにより、約 80K まで冷却している。試料通電用の電流リードは最大で 500A を印加可能なものを導入しており、線材の実用環境下に近い大電流印加時の特性が評価可能である。また、電流リードでの発熱の影響を除くために、電流リード部分に液体窒素タンクを設けている。ホール素子は 3 軸ステージに取り付けられたプローブの先端に設置しており、面内方向に $1\mu\text{m}$ 、高さ方向には $0.25\mu\text{m}$ の空間分解能で走査することができ、最大 20cm の走査エリアを有している。次に、試料付近の詳細図を Fig.2 に示す。冷却された線材に通電し、その際発生する自己磁場の 2 次元分布を、ホール素子の走査により計測し、得られた自己磁場分布から試料面内の電流密度分布を求めることができる。

3. 実験結果及び考察

本システムの定量性の検証を行うために、銅線材に直流電流を印加した際の自己磁場分布測定を行い、リフトオフ距離を変化させ理論値との比較を行った。使用した線材の幅及び厚みはそれぞれ 3mm、1mm である。Fig.3 に 16A の直流電流印加時における自己磁場の一次元分布を示す。図中の点線は試料幅 (3mm) に対応している。同図の結果を見てみると、測定により得られた結果は理論値と良く一致しており、磁場検出における優れた定量性を有することが分かる。

尚、RE123 テープ線材の空間不均一性や、マルチフィラメント構造をはじめとする加工線材の評価例については当日報告する。

4. 謝辞

本研究は超伝導応用基盤技術研究開発の一環として、ISTEC を通じてエネルギー・産業技術総合開発機構の委託により実施したものである。

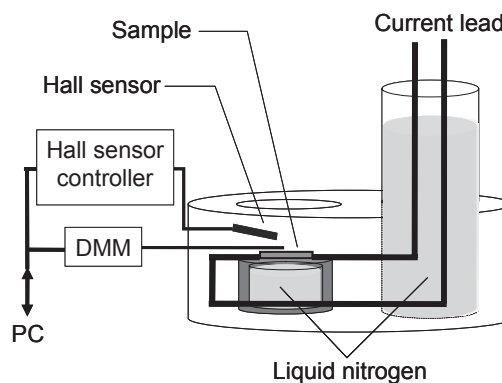


Fig.1 Schematic diagram of scanning Hall-probe microscope.

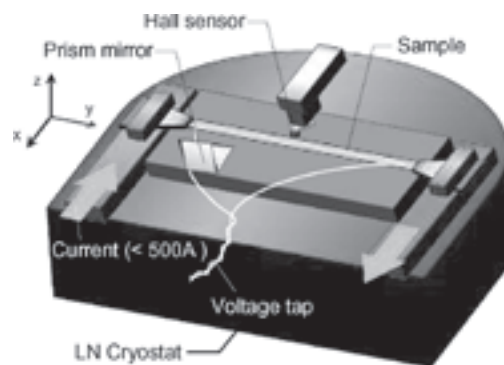


Fig.2 Schematic diagram of sample stage.

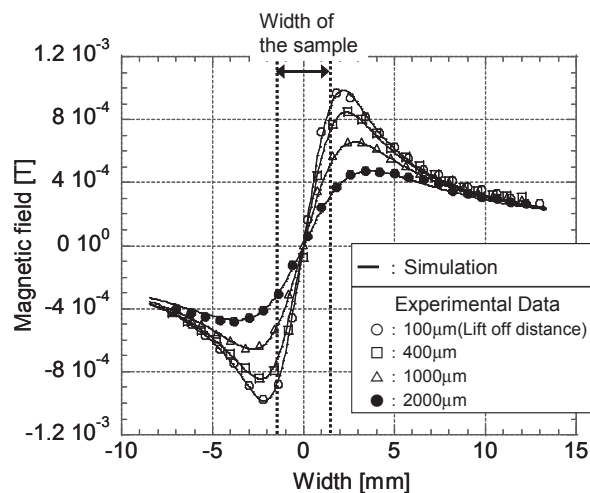


Fig.3 Comparison of the experimental data with the simulation results. Dotted lines indicate the width of the sample.

CVD 法による YBCO 線材の臨界電流特性の超電導層厚依存性

Superconducting layer thickness dependence of critical current property in CVD processed YBCO tape.

姫木携造, 木内 勝, 小田部荘司, 松下照男(九工大);
式町浩二, 渡部智則, 鹿島直二, 長屋重夫(中部電力);
山田 穰, 塩原 融(超電導工学研究所)

HIMEKI Keizo, KIUCHI Masaru, OTABE Edmund Soji, MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.);
SHIKIMACHI Koji, WATANABE Tomonori, KASHIMA Naoji, NAGAYA Shigeo (CEPCO);
YAMADA Yutaka, SHIOHARA Yuh (SRL)
E-mail : himeki@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

はじめに 優れた臨界電流密度 (J_c) を有する YBCO 線材は様々な応用が期待されているが、IBAD/PLD 法で作製された YBCO 線材では超電導層厚によって臨界電流特性が変化する事が知られており、その詳細について研究報告を行った [1]。現在、様々な作製法にて YBCO 線材が作製されており、これらの超電導層厚依存性についても詳細な調査が必要である。そこで本研究では厚さの異なる 5 つの IBAD/CVD 法で作製された YBCO 線材について、直流磁化法及び四端子法により低電界領域及び通常電界領域での臨界電流特性の厚さ依存性を評価した。また、磁束クリープ・フロー・モデルを用いて理論値を実験値とのフィッティングよりピンパラメータを決定し検討を行った。

実験 本研究で使用した試料は、CVD 法により作製された膜厚の異なる YBCO 線材である。各試料の超電導層の厚さ d と T_c は Table 1 に示す。SQUID 磁力計による直流磁化測定と直流四端子法による I - V 測定から臨界電流特性の評価を行った。磁界は c 軸に対して平行に最大 6.5 T まで印加した。電界基準 E_c は SQUID 磁力計では 1×10^{-9} – 1×10^{-10} V/m 程度で、直流四端子法では 1.0×10^{-4} V/m となるところで J_c を決定した。不可逆磁界 B_i は $J_c = 1.0 \times 10^8$ A/m² に減少した磁界により決定した。

結果及び検討 SQUID 磁力計、直流四端子法より得られた 0.1 T における J_c の厚さ依存性を Fig. 1 に示す。測定法によって J_c の値が違うのは電界基準の違いによる。いずれの場合も厚さの増加に伴い J_c (0.1 T) は減少する傾向にあるが、 $d = 0.9 \mu\text{m}$ のものを除いて PLD 法の場合の依存性 $J_c \propto d^{-1/2}$ に比べて弱く、超電導組織の劣化が PLD 法よりも抑えられていると考えられる。

また、Fig. 2 に両測定より得られた B_i の厚さ依存性を示す。 B_i については電界領域によって異なる振る舞いをしていることが分かる。低電界領域においては厚さ増加に伴い B_i は増加する傾向にある一方、通常電界領域においては厚さ増加に伴い B_i は減少する傾向にある。これについても PLD 法と同様の結果が得られた。 B_i 近傍ではピンニング相関距離が超電導層の厚さよりも十分長く、二次元ピンニングとなる。この場合には仮想的な臨界電流密度 J_{c0} と磁束バンドル中の磁束線数 g^2 を用いてピンポテンシャルは $U_0 \propto g^2 J_{c0} d$ のような依存性をもつ。 g^2 は外部磁界 B の増加に伴い増加し、かつ超電導層が薄いほど磁束クリープの影響を受けにくくなるように顕著に増加する。そのために Fig. 2 に示すように通常電界領域では薄い試料ほど高い U_0 をもつ。一方で、低電界領域においては逆の振る舞いを示しているが、これは結果として B_i が低いために g^2 が増加する余地が無く、試料間の g^2 の差が小さくなって d の依存性が強く現れたためである。なお J_c - B 特性や E - J 特性、および理論結果との比較等については当日報告する。

Table 1: Specification of specimens.

specimen	thickness d (μm)	T_c (K)
#1	0.18	87.9
#2	0.36	88.8
#3	0.45	89.5
#4	0.63	90.0
#5	0.90	88.5

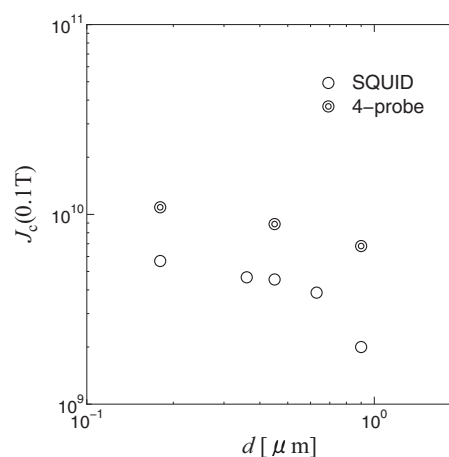
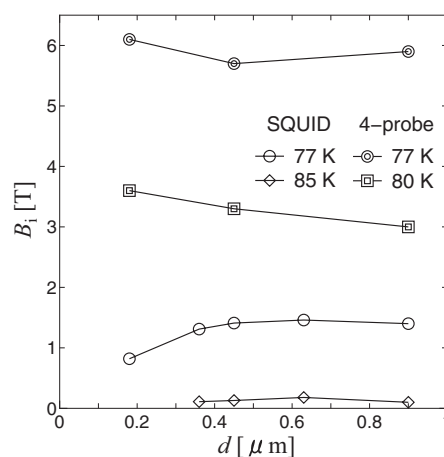
Fig. 1: Thickness dependence of J_c (0.1T) at 77.3 K.

Fig. 2: Thickness dependence of irreversibility field in the temperature region of 77.3–85 K.

謝辞 本研究は、超電導応用基盤技術研究開発業務の一環として、ISTEC を通じて NEDO の委託により実施したものである。

参考文献 [1] K. Himeki *et al.*, Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.146.

Y系線材の電気機器応用に向けた開発 Development of Y system coated conductors for electric equipments

梶本 一臣, 花田 康, 三浦 貴博, 林田 知朗, 羽生 智, 五十嵐 光則, 富士 広, 飯島 康裕, 齊藤 隆(フジクラ)
KAKIMOTO Kazuomi, HANADA Yasushi, MIURA Takahiro, HAYASHIDA Tomoaki, IGARASHI Mitunori, HANYU Satoru, FUJI
Hiroshi, IJIMA Yasuhiro, SAITOH Takashi (Fujikura)
E-mail: kkakimoto@fujikura.co.jp

1. はじめに

Bi系銀シース線材に比べ量産化が困難だとされていた薄膜形成技術によるY系超電導線材だが、最近では数百メートルクラスで $I_c > 300A/10mm^*$ の高特性を持つ線材を安定して作製できるまでに至っている。良好な磁場中特性および低交流損失の見地からY系超電導線材は電力ケーブル、変圧器、船舶用モーター、限流器等への応用が期待されており、世界中で液体窒素温度レベルでのプロトタイプ電気機器の試作が行われようとしている。電気機器の試作のために、フジクラでは、線材作製技術の向上と共に提供用線材作製も同時に行っている。本報告では、各応用機器へ向けた線材作製及び線材提供状況について、基板表面研磨の効果等のプロセス改善に着目して報告する。

2. 線材作製方法

線材作製のベースとなる無配向金属基板は、耐熱性の0.1mmt×10mmw Hastelloyテープを用いた。はじめに連続研磨装置を用いて、平均表面粗さ数十nmレベルまで平滑にした。その上に大型IBAD装置により、金属基板上にGZO面内二軸配向膜を形成した。さらに大型PLD装置によりCeO₂層をIBAD-GZO層上に形成した。その時の基板温度は500~600℃で、成膜雰囲気は100%O₂数10mTorrであった。超電導層は、大型PLD装置により上記の基板上に形成した。その時の基板温度は700~800℃で、成膜雰囲気は100%O₂数100mTorrであった。超電導層成膜後、保護層の5~10μm厚Ag層を連続スパッタ装置により形成し、大型電気炉で100%O₂大気圧中、500℃×数十時間熱処理を行った。完成した超電導素線は、半分の5mm幅にレーザースリッター装置により裁断した。

その後、連続貼り合せ装置により超電導素線に半田メッキした安定化用テープを貼り合せた。安定化用テープとしては、0.1mmt×5mmw Cuテープ(モーターと変圧器用)、0.04mmt×5mmw Ni-Crテープ(限流器用)を用いた。さらに線材に電気絶縁を施すため、連続テープ巻装置を用いて、ポリイミドテープを2層巻した。

3. 線材作製状況

表1に非研磨基板と研磨基板による超電導特性の違いを示す。表1の結果から、同条件でIBAD-GZO膜を形成したにも関わらず、Hastelloy基板表面研磨を施すことにより $\Delta\Phi$ が改善されていることがわかった。これにより、CeO₂層の $\Delta\Phi$ も改善され、最終的に超電導層の I_c 値も改善された。

表2に、限流器用として提供した2km長の線材の仕様を示す。電流容量の大きな0.6kmについては、今回開

発した研磨基板を用いた高 J_c 仕様の線材を適用した。

図1に2007年度までに提供した線材の累積線材長の推移を示す。今年度は、モーターと変圧器用線材として総計約2.7km、限流器用線材として総計約2.0kmを提供した。

4. 謝辞

本研究は経済産業省の「超電導応用基盤技術研究開発(II)」として独立行政法人「新エネルギー・産業技術総合開発機構」からの受託により実施された。

Table.1 Efficacy of polishing for basic Hastelloy tape

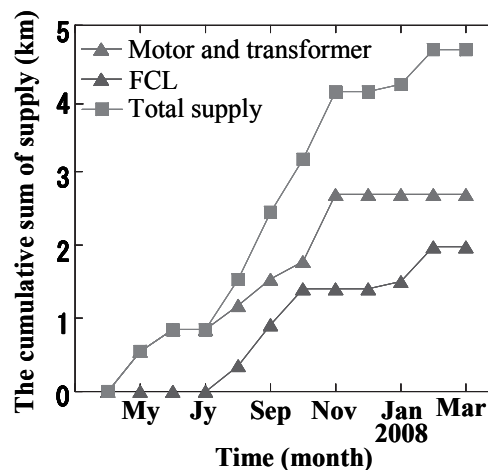
	Non-polished Hastelloy	Polished Hastelloy
IBAD-GZO- $\Delta\Phi$	14~16deg.	10~13deg.
PLD-CeO ₂ - $\Delta\Phi$	5.2~5.8deg.	3.9~4.7deg.
Thick. of Y123	2.0~2.5μm	2.0~2.5μm
I_c	220~300A	330~400A

Table.2 Specification of SC wires for FCL

Application Specification	FCL (former work)	FCL (this time)
Width of tape	5mm	5mm
Laminating tape	0.04mmt NiCr tape	0.04mmt NiCr tape
I_c	60~75A	95~150A
Unit length	35m	24~37m
Total supply	1.4 km	0.6km

*FCL:Fault Current Limiter

Fig. 1 Progression of supply over time



YBCO 超電導線材の過電流パルス通電による特性劣化試験

Experiments on Degradation of YBCO Tapes due to Over-current Pulse Drive

佐藤 俊祐, 河野 秀太郎, 王 旭東, 植田 浩史, 石山 敦士(早大); 鹿島 直二, 長屋 重夫(中部電力); 八木 正史, 向山 晋一(古河電工); 飯島 康裕, 齊藤 隆(フジクラ); 塩原 融(ISTEC)

SATO Shunsuke, KONO Hidetaro, WANG Xudong, UEDA Hiroshi, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University); KASHIMA Naoji, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Company); YAGI Masashi, MUKOYAMA Shinichi (Furukawa Electric); IJIMA Yasuhiro, SAITO Takashi (Fujikura); SHIOHARA Yuh (ISTEC)
E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

YBCO 超電導線材を送電ケーブルや限流器などの電力機器に応用する場合、突発的な短絡電流が線材に流入し、それによって線材の温度が急上昇して超電導特性が劣化する恐れがある。したがって線材の超電導特性劣化のメカニズムを知ることは超電導機器の設計において重要である。

そこで我々は過電流パルス通電による特性劣化試験を行ってきた⁽¹⁾。今回は、これまで行った試験結果をまとめて報告する。

2. 実験方法

これまで劣化試験を行ってきた線材の諸元を Table 1^[1]に示す。線材には安定化層側表面に電圧タップと熱電対温度計を取り付けた。Sample によってその配置は異なるがその代表例を Fig.1 にしめす。ここで電圧タップにより分けられた区間をそれぞれ左から V_{12} 、 V_{23} 、 \dots 、 V_{910} と名づけた。

実験は GM 冷凍機による伝導冷却下で運転温度(60-85K)として以下の手順で行った。

(i) 各区間の臨界電流値 I_c (1 μ V/cm 基準)を測定

(ii) I_c 以上の過電流パルスを 1 秒間通電し、

銀層の抵抗-温度依存性より最高到達温度を算出

(iii) 再び I_c を測定し、劣化の有無を確認

I_c の劣化が観測されるまで過電流パルスの最大値(Ipeak)を上げながら(ii), (iii)の手順を繰り返し、劣化開始時の最高到達温度を求めた。なお本実験では 2A 以上の I_c の低下を劣化とした。また、温度は熱電対温度計から得られた値を参考に安定化層(Ag)の抵抗率の温度依存性を利用して求めた。

3. 実験結果とまとめ

劣化無しで許容できた最高到達温度(以降、 T_{max})を諸元と合わせて Table 1 に示す。ここで示している温度範囲は劣化を確認した区間の中で最も低い温度で劣化を始めた区間の劣化開始温度を下限に、最も高い温度で劣化を開始した区間の温度を上限としている。

Table 1 より、まず製造プロセスの違いに注目すると IBAD/PLD、IBAD/MOCVD 線材共に 500-600K で劣化を開始する傾向が見られた。Ag 層の厚みについてもその厚みに関係なく同様の傾向が見られた。

運転温度別に見ると運転温度 70-80K の場合は T_{max} に差は見られなかった。しかし、運転温度が 60K の場合(Sample 3)は 400K 程度で劣化開始する区間が存在した。

曲げ歪みの有無で比較してみると、曲げ歪み(引張り歪み 0.47%)を加えた線材 Sample 8 とその歪みを無視できる線材 Sample 7 の T_{max} は共に 550-650K 程度であった。

以上のように結果を概観して見ると様々な形状、状況下に置かれた線材も 500-600K の範囲に許容できる最高到達温度が含まれる傾向があることが分かる。

しかし、YBCO 層の厚みで比較してみると YBCO 膜厚が 0.2-2.0 μ m の線材については上記と同様な傾向が見られるが

Sample 6(YBCO 膜厚が 2.5 μ m)は温度が 732K に達する区間が存在しても劣化を確認することができなかった。

また、Sample 1 と Sample 2 を比較すると、劣化せずに許容できる Ipeak は Ag 層の厚み、即ち安定化層の抵抗値に依存している。

Sample 11-14 は線材をレーザーにより幅方向に分割し細線化したものであり、細線化が T_{max} に影響を与えた可能性がある。細線化の影響については層間接触試験^[2]により層間剥離を調べ、検証していく必要がある。

今後は試料数を増やして実験を行うとともに、さらに走査型電子顕微鏡(SEM)や透過型電子顕微鏡(TEM)を用いた表面観察によりさらに詳細な劣化の原因の検証を引き続き行っていく予定である。

Table 1 Specification of YBCO Superconducting Tapes

	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6	Sample 7
Manufacturing Method	IBAD/PLD			IBAD/MOCVD		IBAD/PLD	
Length, mm	50	50	50	150	150	70	80
Width, mm	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	3.5	5.0
Ag Thickness, μ m	-	-	-	-	-	-	-
YBCO Thickness, μ m	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	2.5	0.5
Insulator Thickness, μ m	100	100	100	100	100	100	100
Operating Temperature, K	80	80	60	80	80	80	80
Bending Strain, %	-	-	-	-	-	0.09	0.09
Permittivity Temperature, K	600-610	670-710	470-490	500-610	570-660	732	587-670
Initial and final I_c	34.0	31.3	308.9	37.4	301.0	43.7	44.1
Permittivity Ipeak, A	108-110	134-175	212-213	100-105	100-150	61.5	70-71

	Sample 8	Sample 9	Sample 10	Sample 11	Sample 12	Sample 13	Sample 14
Manufacturing Method	IBAD/MOCVD			IBAD/PLD			
Length, mm	60	70	70	80	60	70	70
Width, mm	5.0	5.0	5.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Ag Thickness, μ m	-	-	-	100	100	100	100
YBCO Thickness, μ m	1.1	2.0	1.1	2.0	2.0	2.0	1.1
Insulator Thickness, μ m	0.5	1.7	2.0	1.0	1.0	1.0	0.5
Operating Temperature, K	100	100	100	100	100	100	100
Bending Strain, %	0.47	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
Permittivity Temperature, K	600-670	606-711	604	550-574	514-616	570-660	713-876
Initial and final I_c	83.2	71.4	54.3	26.5	23.2	25.8	32.9
Permittivity Ipeak, A	71-72	90-91	75	90-98	104-106	126-127	118-119

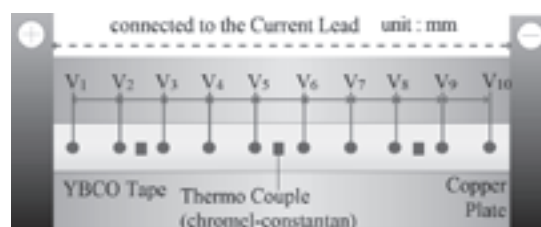


Fig. 1 Arrangement of voltage taps and thermo couples

なお本研究は、超電導応用基盤技術研究体の一部として新エネルギー産業技術総合開発機構の委託により実施したものである。

文献

- [1] 石山敦士・王旭東他：2006年度電気学会超電導応用電力機器研究会、電気学会研究会資料 ASC-06-26 (pp. 49-54)
- [2] 河野秀太郎他：2008年度春季低温工学・超電導学会講演概要集(講演番号 1A-a05)

エポキシ樹脂によるY系線材の剥離特性評価法の検討

A method for evaluating delamination properties of YBCO C.C. by epoxy resin

鉄道総研^A, ○富田 優^A, 鈴木 賢次^A

○M. Tomita^A, K. Suzuki^A,

Railway Technical Research Institute^A,

E-mail: tomita@rtri.or.jp

1. はじめに

イットリウム (Y) 系線材は、低コスト、磁場中高臨界電流密度特性、高機械強度等のメリットがあり、将来の超電導機器への適用が期待されている。しかしながら、Y系線材は、セラミックスの多層薄膜及び金属テープの複合材であるため、応用の際、層間での剥離が発生し超電導線材として機能しなくなることがある。そのため、線材の剥離特性を定量的に把握することが要求されている。⁽¹⁾ 今回、半導体の分野で広く用いられている、MELT法(Modified Edge Liftoff Test) (Fig.1) による線材の剥離特性評価を行ったので報告する。

2. 実験方法(MELT法)

MELT法では、剥離時に放出されるエネルギーは、エポキシ樹脂層に保存されたひずみエネルギーに等しいと仮定すれば、剥離面の密着強度は次式で表される。⁽²⁾

$$K_{IC} = \sigma_0 \sqrt{h/2} \cdots(a)$$

但し、 $\sigma_0(T)$: 残留応力 (温度の関数), h : 樹脂厚さである。

この時、使用した樹脂に関して残留応力と温度の関係が既知であれば最終的に密着強度値を算出することができる。

本実験に使用したY系線材の仕様は、Table1に示す通りである。はじめに、Ag安定化層側にエポキシ樹脂を塗布し、硬化(170°C, 1h)させ、マイクロメータにより膜厚を測定する。その後、約10mm角に加工を行ったのち、サンプル片(10mm角×20個)を低温室にて、-3°C/minで温度降下させる。並行してCCDによりサンプルの状態をモニタし、剥離の発生した温度を記録した。

3. 実験結果

Fig.2に樹脂厚さと剥離発生温度の関係を示す。樹脂厚さと剥離温度は反比例の傾向がある。これは、サンプルのある密着強度値 K_{ic} (一定)に対し(a)式の成立を示唆しており、MELT法がY系線材の定量的剥離特性評価に適用可能であることわかる。また、参考値ながら、Fig.2より算出した平均の K_{ic} は、0.20 (MPa・√m) であり、線材の多層構造中で最も弱い層間の密着強度を定量的に得ることができた。Fig.3には剥離面(最も弱い層間)の外観写真を示す。図中の○印は剥離の起点である。当日は、剥離面の分析結果についても報告する予定である。

Table 1 Specification of YBCO C.C.

項目	仕様
寸法	0.1mm×12mm 幅
I_c	>300 A (77 K, 0 T)
線材構造	Ag/超電導層/中間層/Hastelloy
使用本数	4本
長さ	10 cm

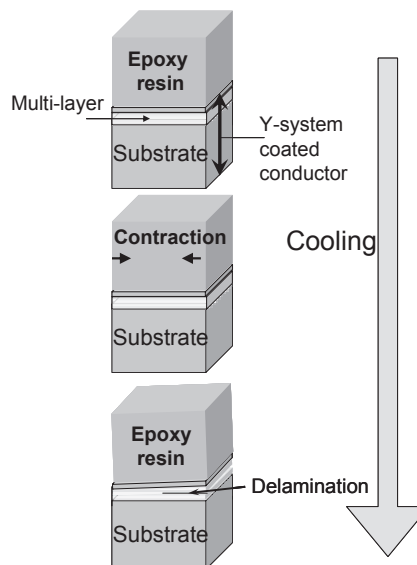


Fig.1 The concept of MELT

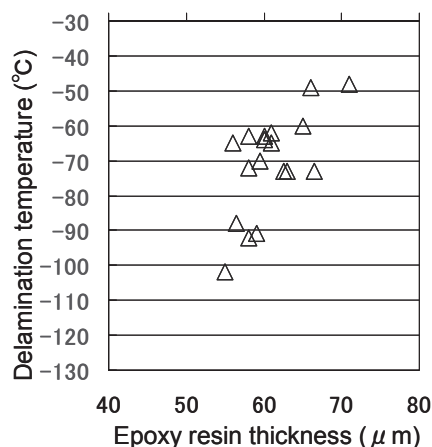


Fig.2 The relation between epoxy resin thickness h and delamination temperature T

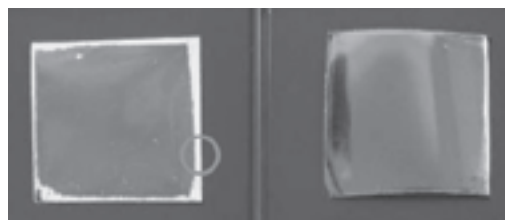


Fig.3 Picture of samples after delamination (Left : Hastelloy side, Right : Ag side)

参考文献

- 1) D. C. van der Laan, J. W. Ekin, C. C. Clickner, T. C. Stauffer, Supercond. Sci. Technol. 20 (2007) 765.
- 2) E. O. Shaffer II, F. J. McGarry, L. Hoang, Poly. Sci & Eng., 36 (1996) 2375.

大型 IBAD 装置による 500m 級長尺中間層の作製と高速化

Long-length IBAD-buffer layers for 500m-coated conductors and the approach for high-speed processing by the large-scale IBAD system

羽生智, 林田知朗, 飯島康裕, 花田康, 五十嵐光則, 富士広, 柿本一臣, 齊藤隆(フジクラ)

HANYU Satoru, HAYASHIDA Tomoaki, IJIMA Yasuhiro, HANADA Yasushi, IGARASHI Mitsunori, FUJI Hiroshi, KAKIMOTO Kazuomi, SAITOH Takashi(Fujikura Ltd.)

E-mail:s_hanyu@fujikura.co.jp

1.はじめに

RE系超電導線材の長尺化が進んでいることから、線材応用として、本格的に限流器、変圧器、モーター等が検討されている。現在、我々は IBAD-PLD 法により高特性長尺線材の作製に成功しており、応用機器開発向けに線材提供も行っている。超電導線材の構造は、IBAD-Gd₂Zr₂O₇(以下 GZO)、PLD-CeO₂ の中間層、PLD-GdBCO 超電導層そして銀保護層となっている。IBAD-GZO は成膜条件が比較的広く PLD-CeO₂ との相性も良いが、安定した特性を得るためには 3m/h 程度の製造速度であった。金属基板を研磨することで IBAD-GZO の膜厚に対する配向性が向上することから、 $\Delta\Phi = \sim 15^\circ$ 程度の線材を高速に作製できる。今回 500m 級の線材についても研磨を施し長尺線材の成膜を行うこととした。実績のある IBAD-GZO 開発と同時に、製造速度向上を狙った MgO についても大型装置にて検討を行っている。本発表では GZO の結果とあわせて報告する

2.実験方法

IBAD-GZO 線材について、研磨を施した 500m 級の無配向金属テープ基板を用い長尺成膜を行った。初めに 48m/h で 16 層成膜を行い(製造速度 3m/h)、研磨基板上での長尺線材の配向性を X 線回折測定により評価した。本線材に関しては 500m PLD-CeO₂ および 500m PLD-GdBCO を成膜した。次に同様の研磨基板を用いて 500m の線材について線材搬送速度 60m/h で 12 層成膜を行った(製造速度 5m/h)。アシストビームを基板法線方向から 55° で照射し、ターゲット組成は Gd₂O₃:ZrO₂=1:2 とした。イオンビームのガスはアシスト、スパッタ共に Ar を用いた。

IBAD-MgO 線材については、Y₂O₃ を成膜した研磨基板上に成膜を行った。成膜は短尺サンプルにて行い、線材搬送速度は 100m/h-1 層にて行った。MgO の評価は、イオンビームスパッタにより MgO を 300°C でエピタキシャル成膜したのちに X 線回折測定を行うことで評価した。

3.結果及び考察

製造速度 3m/h の 500m IBAD-GZO 線材について、前後端の X 線測定の結果から配向度が $\Delta\Phi = 10.7\text{--}13.4^\circ$ (膜厚 1.2 μm) の膜が得られた。本基板上に PLD-CeO₂ を成膜した結果、 $\Delta\Phi = 3.8\text{--}4.3^\circ$ となり高特性超電導線材用の中間層として適した線材作成に成功した。製造速度 5m/h の 500m IBAD-GZO 線材については、 $\Delta\Phi = 12.2\text{--}14.8^\circ$ 、 $\Delta\Phi = 12.6\text{--}16.0^\circ$ の作製に成功した(Fig.1)。 $\Delta\Phi = 16.0^\circ$ の部

分も膜厚が 0.8~1.0mm と若干薄いため数値が高いが、PLD-CeO₂ を成膜すると $\Delta\Phi = \sim 4^\circ$ となる。

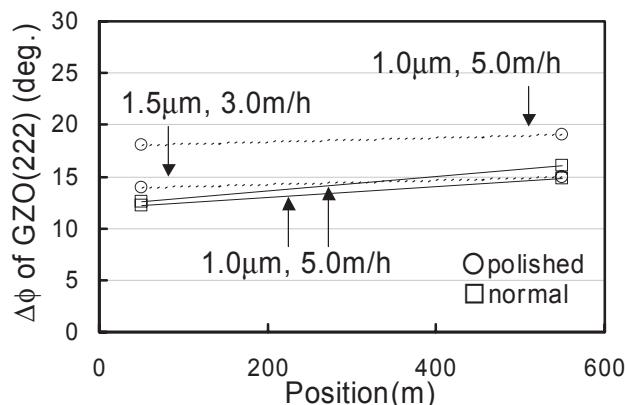


Fig.1 In-plane textures of IBAD-GZO on polished and non-polished hastelloy tapes. On polished tapes, IBAD-GZO have fine texture at 5.0m/h. Tape lengths are all 500m.

IBAD-MgO に関しては全 15 レーン中、均等に 5 レーンを選び短尺サンプル上に成膜した。複数の条件にて、中心 9 レーン分の範囲で $\Delta\Phi = 10\text{--}20^\circ$ が得られている。各レーンにおいて 100m/h-1 層であることから長尺成膜時に高速化が見込まれる。

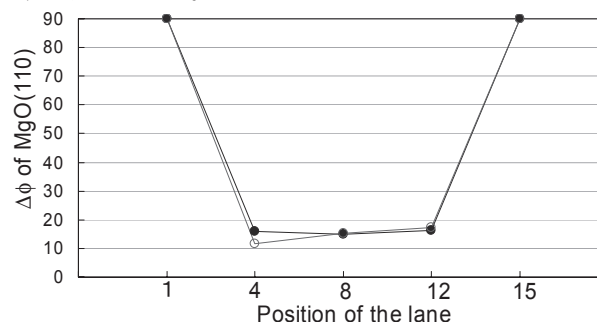


Fig.2 In-plane textures of IBAD-MgO at each lane. Tape-speed is 100m/h. XRD measurement are performed after epitaxital deposition at 300°C.

4.謝辞

本研究は経済産業省のプロジェクトである「超電導応用基盤技術研究開発(II)」として独立行政法人「新エネルギー・産業技術総合開発機構 NEDO(New Energy and Industrial Technology Development Organization)」からの受託により実施された。

RE123 超電導バルク電流リードの保護回路設計及び評価 Design and evaluation of protection circuit for RE123 bulk current lead

小田 淳也, 稲田 亮史, 中村 雄一, 太田 昭男 (豊橋技術科学大学)
ODA Junya, INADA Ryoji, NAKAMURA Yuichi, OOTA Akio (Toyohashi University of Technology)
E-mail: j-oda@super.eee.tut.ac.jp

1. はじめに

超電導コイルに電流を流すために電流リードが必要となるが、これに RE123 超電導バルク電流リードを用いることにより、従来の金属電流リードに比べ、熱侵入の低下とコンパクト化が期待できる。しかし、バルク超電導電流リードがクエンチを引き起こした際、リードの焼損等の危険性が有る。そこで、本研究では超電導リードに並列に金属材料を保護回路として取り付けることを考え、その有効性について検討する。具体的には、取り付け際の金属材料による定常熱侵入とクエンチ時の超電導リード体と金属材料の温度変化等について数値計算及び実験で検討する。

2. 方法

金属の保護回路材料による定常熱侵入は Wiedemann - Franz の法則を仮定し抵抗値と熱侵入量の関係から導いた。今回、保護回路による定常熱侵入が 10W 以下となるように保護回路材料の寸法を決定した。

次に超電導電流リードがクエンチした際の超電導体と金属保護材料の電流・温度の変化を断熱・内部均一温度の条件で計算した。この際、初期温度を 90K とし、抵抗値の温度依存性を考慮した。また、保護回路材料は銅合金(Cu-2Be, $\rho = 6.0 \times 10^{-9} \Omega\text{m}$ @ 77K) 及びステンレス ($\rho = 4.8 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$ @ 77K)、電流リードに使用する超電導体は $\phi 2\text{mm}$ 長さ 100mm の銀添加 Sm123 とした。

3. 結果及び考察

Fig.1 に保護回路材料にステンレスを用い、定常熱侵入を 0.5W としたときのクエンチ後の電流減衰と超電導電流リード及び保護回路材料の温度変化の関係を示す。ここで、電流減衰時定数を 30sec, 初期通電電流は 1000A とした。図のように 30~40sec で超電導体と保護回路材料の温度上昇は 35~40K で飽和し、超電導リードの焼損を防止できることがわかる。

Fig.2 に保護回路材料としてステンレス及び銅合金を用いた際の定常熱侵入とクエンチ時の温度上昇の最大値の関係を示す。ここでは保護回路材料の長さとしてステンレスは 100mm、銅合金については 100, 200mm の場合を示す。また、熱侵入一定のとき、どの材料でも初期抵抗値は等しい。Fig.2 より、どの材料も定常熱侵入を小さくするために、保護回路材

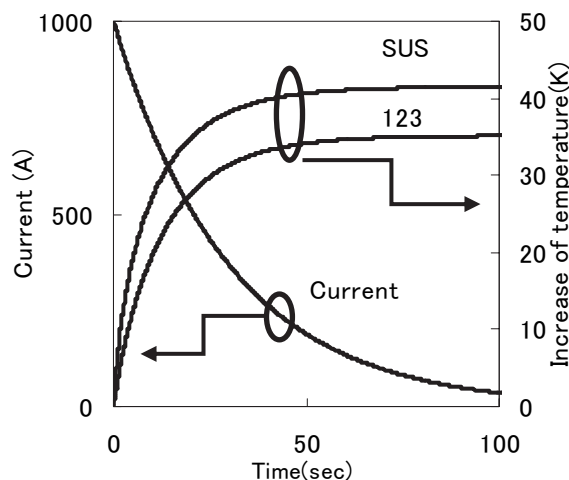


Fig.1 Increase of temperatures of 123 lead and protection circuit(SUS)

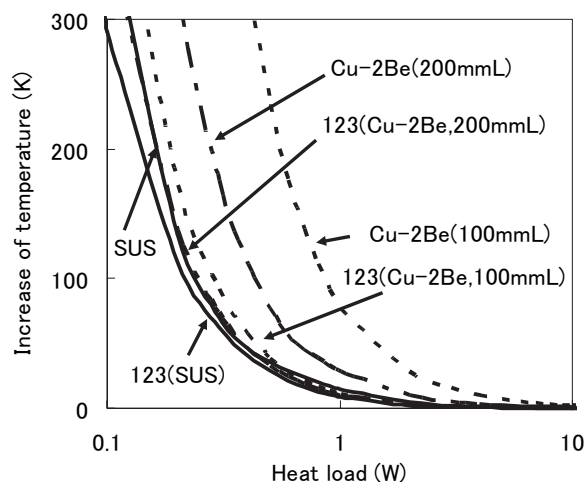


Fig.2 Dependence of maximum temperatures of 123 leads and protection circuits(SUS and Cu-2Be) on heat load

料の断面を小さくすると抵抗値があがり、発熱量が大きくなるため、温度上昇も大きくなる。また、抵抗率の小さい銅合金では長さがステンレスと同じ場合、同じ抵抗値を得るために断面積を小さくする必要がある。その結果、体積(熱容量)が小さくなるため、上昇温度が大きくなる。また、同じ材料でも長さを 100mm から 200mm へ伸ばし、体積を増すことにより、温度上昇を抑えられることがわかった。これより許容する定常熱侵入と保護回路材料の抵抗率及び体積のバランスが上昇温度を決める重要なファクターとなることがわかった。また、実験で評価した結果については当日報告する。

線材内の磁化電流を考慮した超伝導レーストラックコイルの電磁界解析モデル

Model for electromagnetic field analysis of racetrack coil wound with high Tc superconducting tapes considering magnetization currents

赤地 健, 坂本 憲一(横浜国大・工); 雨宮 尚之(京大・工)

AKACHI Ken, SAKAMOTO Kenichi (Faculty of Engineering, Yokohama National University); AMEMIYA Naoyuki (Graduate School of Engineering, Kyoto University)

E-mail: d07gd101@ynu.ac.jp

1. はじめに

冷却コストの低減及び高磁界発生等の観点から、高温超伝導テープ線材の加速器用レーストラックコイルへの適用が検討されている。しかし、高温超伝導レーストラックコイルに電流を通電すると、線材内において外部磁界と自己磁界に対する磁化(遮蔽)電流が誘起され、線材内の電流密度分布の様性が失われ誤差磁場が発生する(ここでは、均一電流によって発生される磁場との差を誤差磁場と定義する)。このようにして発生した誤差磁場によって、加速器に必要な磁場精度が損なわれる可能性がある。

本研究ではレーストラックコイルにおいて、磁化電流に起因して発生する誤差磁場の解析モデルを提案する。さらにそのモデルを用いて高温超伝導レーストラックコイルにおける誤差磁場について試解析を行ったので報告する。

2. 解析モデル

レーストラックコイルの1ターンの形状を Fig. 1(b)に示すように直線部分と半円部分との組み合わせで表現した。そしてこれを入れ子状に重ねる事によりコイルをモデル化した。まず、ファラデーの法則に電流ベクトルポテンシャルを用いて変数変換すると(1)式が得られる。

$$\nabla \times (\rho \nabla \times \mathbf{T}) = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

これにビオ・サバールの法則を適用すると

$$\nabla \times (\rho \nabla \times \mathbf{T}) = -\frac{\mu}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \frac{(\nabla \times \mathbf{T}') \times \mathbf{r}}{r^3} dV - \frac{\partial \mathbf{B}_0}{\partial t} \quad (2)$$

となり、この式と線材面に対する法線ベクトルとの内積をとると解くべき支配方程式(3)が得られる。

$$\nabla \times (\rho \nabla \times \mathbf{nT}) \cdot \mathbf{n} = -\frac{\mu_s t_s}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \iint_S \frac{\{\nabla \times (\mathbf{n}'T')\} \times \mathbf{r} \cdot \mathbf{n}}{r^3} dS - \frac{\partial \mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{n}}{\partial t} \quad (3)$$

ここで \mathbf{B}_0 は外部から印加される磁束密度である。又、 t_s は超伝導層の厚さ、 \mathbf{n} は超伝導線材表面における磁界計算点(Field point)の法線ベクトル、 \mathbf{n}' は超伝導線材表面における電流点(Source point)の法線ベクトル、 S は超伝導線材面の面積、 T は磁界計算点の電流ベクトルポテンシャル、 T' は電流点の電流ベクトルポテンシャルである。次に Fig. 1(a)から(c)に示すように磁界計算点と電流点を考えると、支配方程式は以下のように変形される。

$$\nabla \times (\rho \nabla \times \mathbf{nT}) \cdot \mathbf{n} = -\frac{\mu_s t_s}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{Elements} \iint_{S_c} \frac{(\partial T'/\partial y) r_x \cos \theta + (\partial T'/\partial x) r_y}{r^3} dx dy \quad (4)$$

ただし、今回の解析では外部磁界は存在しない為に \mathbf{B}_0 は零となる。(4)式の支配方程式を用いて、線材の断面を有限個の要素に分割し、各要素に電流が流れているものとして、1次元 FEM を適用して解析を行った。超伝導体の E - J 特性は n 値モデルを用いて表現した。

3. 試解析結果

Table 1 に線材諸元、Table 2 にコイル諸元、Fig. 2 に概念図を示す 10ターンのコイルを2つ重ねたモデルにおける電流密度分布及び誤差磁場の解析を行った。Fig. 3 に線材断面内の電流密度分布(直線部、最内側ターン)と上下のレーストラックコイルの中間部、レーストラック長軸に沿った方向の磁場分布(磁化電流考慮、一様電流分布仮定)と誤差磁界分布を示した。ここで、 $X_p = 0$ がコイル中心に相当する。

謝辞

本研究の一部は、JST 産学共同シーズイノベーション化事業 顕在化ステージ「交流超伝導技術を用いた重粒子線がん治療装置の高機能・小型化」の一環として実施されたものである。

Table 1. Specifications of superconducting tape

Tape width	4 mm
Thickness of superconductor layer	1 μm
Critical current density	$2 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$

Table 2. Specifications of racetrack coil

Number of coils	2
Number of turns	10
Length of straight line	200 mm
Innerdiameter of curve line	80 mm

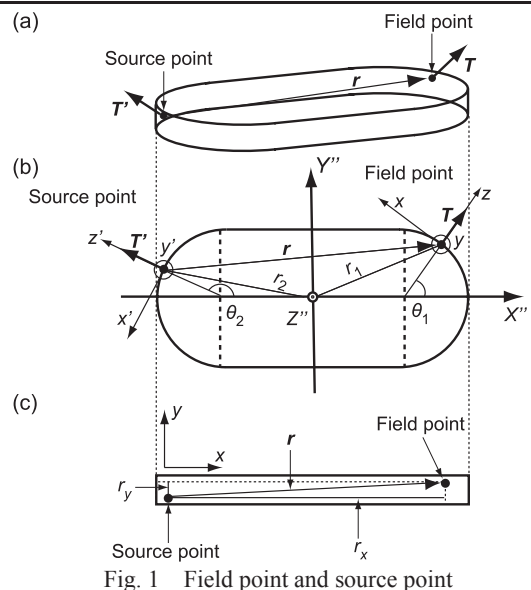


Fig. 1 Field point and source point



Fig. 2 Schematic of analyzed racetrack coil

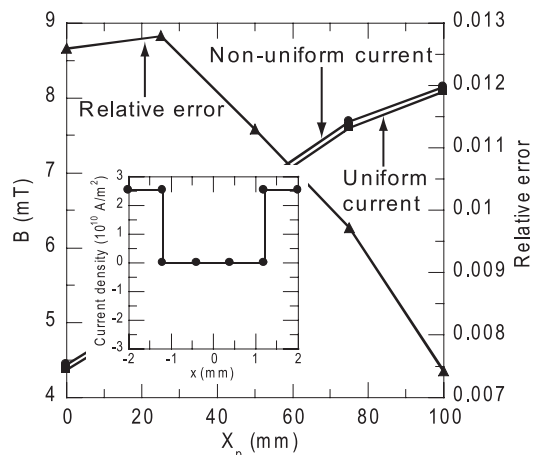


Fig. 3 Current profile across superconducting tape and field error of racetrack coil

LHD ポロイダルコイルにおける 10 年間の圧力損失特性の変化

Change in pressure drop characteristics of LHD poloidal coils over a 10-year period

高畑 一也, 森内貞智, 大場恒揮, 前川龍司, 三戸 利行 (NIFS)

TAKAHATA Kazuya, MORIUCHI Sadatomo, Ooba Kouki, MAEKAWA Ryuji, MITO Toshiyuki (NIFS)

E-mail: takahata@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

大型ヘリカル装置(LHD)のポロイダルコイルは、ケーブル・イン・コンジット(CIC) 導体を使用した強制冷却型コイルである[1]。3 対, 6 個のコイルから構成され、径の小さなものから IV, IS, OV コイルと呼んでいる。また上下コイルは-U, -L を付記して区別する。CIC 導体を採用するに当たって、懸念されたことは、異物の混入による冷媒流路の閉塞である。特に、コンジットに開けられた冷媒導入孔からケーブルに冷媒が入る部分は、異物が蓄積しやすい構造となっている[2]。異物には、金属粉、圧縮機からの油分、ヘリウムガス中の不純物ガスの固化体などが考えられる。このような異物の混入を防ぐため、コイルの冷媒入口配管にメッシュフィルターを設置した。その効果もあり、運転開始から 10 年間、冷媒流路の閉塞は観測されていない。このことを圧力損失特性の観測結果を用いて報告する。

2. 室温における圧力損失特性

LHD 超伝導コイルは、1 年のうち約 5 ヶ月間を 1 サイクルとして運転を行っている。各サイクルの前後には、コイルの冷却・昇温期間が約 1 ヶ月設けられている。Fig. 1 に、この 10 年間の各サイクル冷却前の室温における圧力損失特性を代表的な IV-U コイルについて示した。コイルに流れる流量は約 2 g/s である。摩擦係数 λ は次式で定義した[2]。

$$\Delta P = \lambda(L/D_h)(\rho V^2/2)$$

ここで ΔP は入口・出口の圧力差(圧力損失), L は流路長, D_h は水力学的直径, ρ は冷媒の密度, V は平均流速である。1 個のコイルには 16 の並列流路があるが、その内の 1 流路が閉塞した場合、他の 15 の流路の流速 V が(16/15)倍に増加するため、見かけの摩擦係数は約 14%増加することになる。しかし、Fig. 1 から分かるように、全てのデータは、これらを直線で近似した値(実線)から $\pm 1\%$ の範囲に入っている。この結果は、室温において、冷媒流路の閉塞が起こっていないことを示している。金属粉などの固形物の侵入に対して、メッシュフィルターが有効に働いたと考えられる。

3. 低温における圧力損失特性

極低温になると、不純ガスの固化体が冷媒流路を閉塞する可能性がある。Fig. 2 に 10 年間の定常運転時における摩擦係数を示す。定常運転時には、各コイルに約 60 g/s の超臨界圧ヘリウムが流れる。室温からの流量の増加に伴い、レイノルズ数が 2000~3000 まで増加し、ゆるやかに乱流に遷移する。Fig. 2 から分かるように、サイクル数が増すにつれて、摩擦係数が減少する傾向が観測された。この傾向は、6 個のコイルの内 4 個で明確に観測された。一方で、経年的な摩擦係数の増加傾向、運転サイクル中の摩擦係数の増加は、全てのコイルにおいて観測されなかった。このことから、低温においても冷媒流路の閉塞が起こっていないことが確認された。

サイクル毎の摩擦係数の減少傾向を見ると、不連続に変化していることが分かる。従って、コイル冷却過程における熱収縮が関与している可能性がある。現在、冷却過程によって、撚線がどのように変形し、それが摩擦係数にどのように影響するかを調査している。

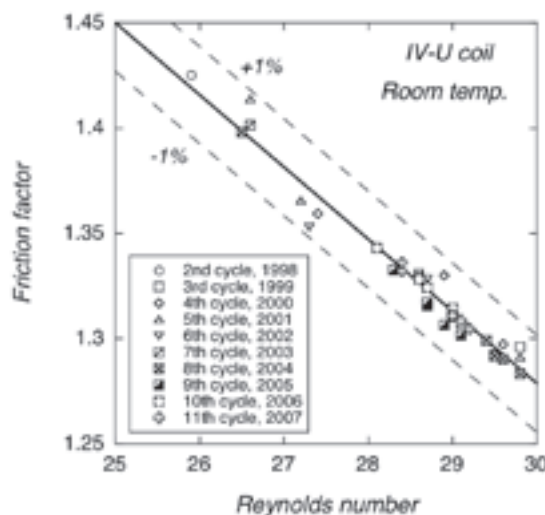


Fig. 1. Pressure drop characteristics at room temperature in the IV-U coil.

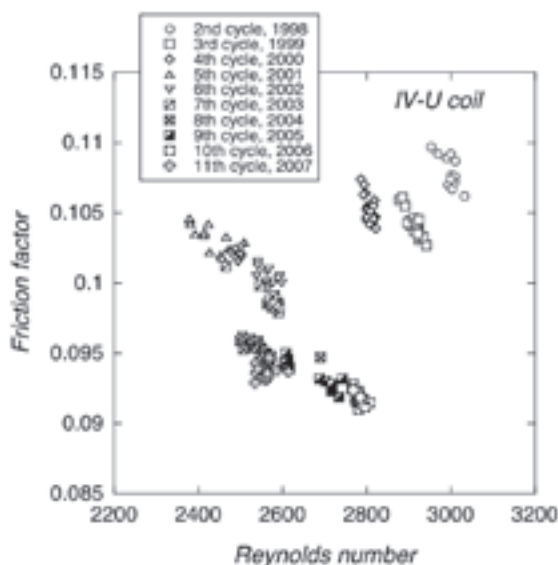


Fig. 2. Pressure drop characteristics at cryogenic temperature in the IV-U coil

参考文献

1. K. Takahata, et al.: Cryogenic Engineering, Vol. 32 (1997) p.573.
2. K. Takahata, et al.: Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 45 (2000) p.1111.

サブクール液体窒素中における Bi-2223 超電導マグネットの特性 Characteristics of Bi-2223 Superconducting Magnet in Subcooled Liquid Nitrogen

小田部 荘司, 木内 勝, 松下 照男(九工大);

林 敏広, 大松 一也(住友電工); 倪 宝荣(福工大)

OTABE Edmund Soji, KIUCHI Masaru, MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.);

HAYASHI Toshihiro, OHMATSU Kazuya (Sumitomo Electric Ind.);

NI Baorong (Fukuoka Inst. of Tech.)

E-mail: otabe@cse.kyutech.ac.jp

はじめに Bi-2223 銀シーステープの臨界電流は、CTOP (ConTrolled Over Pressure) 法を導入することにより、格段に改善されてきた。77.3 K 自己磁場での臨界電流は 200 A を越えており、さらなる改善が期待されている。前回、Bi-2223 銀シーステープを用いた酸化物超電導マグネットを設計製作し、77.3 K において通電電流 50 A で、中心に置ける最大磁界 0.5 T を得ることができたことを報告した¹⁾。今回は、サブクール液体窒素中においてマグネットの特性を評価した。

解析 ここで用いられた Bi-2223 超電導テープの臨界電流は 77.3 K 自己磁場において 147 A であった。前回、77.3 K において垂直磁界中のテープの臨界電流特性からロードライン 3.2 mT/A によって中心最大磁界を予測することができることを示した。Fig. 1 には同様に各温度での垂直磁界中でのテープの臨界電流特性から予想した、マグネット中心における予想される最大磁界の温度依存性を示す。これによるとサブクール液体窒素温度の 65 K においては 0.7 T 程度の中心最大磁界を得ることができることが予想できる。また仮に 55 K 程度に冷却すれば 1T の磁界を発生させることができると予想できる。

結果及び検討 Fig. 2 に 65 K まで減圧して冷却したサブクール液体窒素中における、Bi-2223 酸化物超電導マグネットの電圧 - 電流特性を示す。 10^{-4} V/m の電界基準で決定されるマグネット全体の臨界電流は 78.4 A であり、この時の中心で発生している磁界は 0.78 T である。したがって、Fig. 1 で予想した値とほぼ一致していることがわかり、他の温度での特性をおおよそ予想することができることがわかる。本マグネットは 10 個のダブルパンケーキコイルを常電導接続しているので、両端のコイルをさらに臨界電流特性のよい Bi2223 銀シーステープで製作されたコイルに置き換えることにより、特性を向上させることができると期待される。つまり、垂直磁界中の臨界電流特性で全体のマグネットの性能は決定してしまいが、マグネットの大部分は平行磁界が印加されており、その臨界電流は垂直磁界中の臨界電流よりもはるかに高い。したがって、グレーディングをすることが非常に有効である。この試みについては当日発表する。

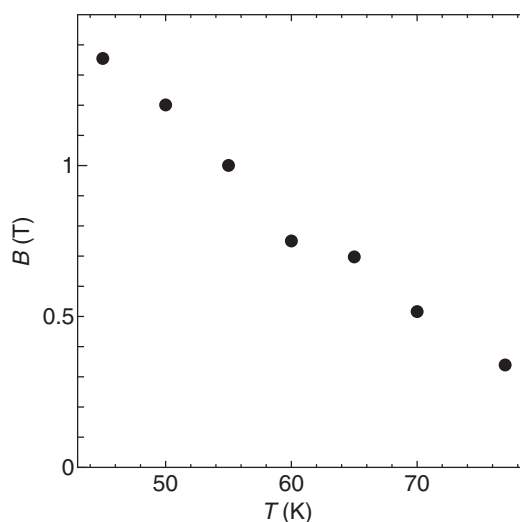


Fig. 1: Temperature dependence of prediction of maximum magnetic field at center of magnet. 0.7 T is expected at subcool L. N₂ (65 K).

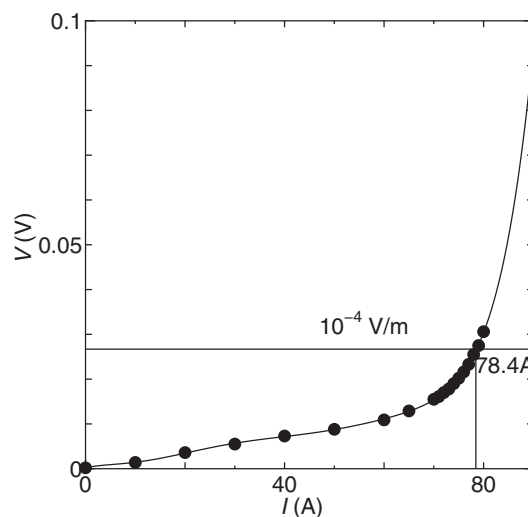


Fig. 2: Current-Voltage characteristics of Bi-2223 oxide superconducting magnet at 65 K by subcooled L. N₂. Maximum magnetic field, 0.78 T is obtained at 78.4 A.

参考文献 1) E.S. Otabe *et al.*, Abstracts of CSJ Conference 77 (2007) 225.

巻き戻し構造を持った HTS 変圧器型超電導限流器の基礎検討

Basic experiments on transformer type SCFCL of rewound structure using BSCCO wire

新居辰彦, 正野由美, 白井康之 (京大)

Nii Tatsuhiko, Shouno Yumi, Shirai Yasuyuki (Kyoto Univ.)

E-mail: nii@pe.energy.kyoto-u.ac.jp

1. 緒言

変圧器型限流器では、限流インピーダンスは1次側コイルのインダクタンスで決まり、限流動作開始電流および限流特性はS/N転移する2次側コイルのインダクタンスと発生する常電導抵抗に依存する。

そこで良好な限流特性を得るには、2次側コイルのインダクタンスを小さく、2次側常電導抵抗を大きくすることが必要となるが、通常同軸コイル構造では、線材長を長くすればインダクタンスも大きくなり、設計の裕度が小さい。[1]

本研究では、原理確認のため、BSCCO線(n値18,臨界電流値100A)を用いた巻き戻しコイル構造を採用することで設計裕度を大きくできることを示し、モデル装置を製作して確認した。

2. 巻き戻しコイル構造の原理

巻き戻し構造を持つ変圧器型超電導限流器の断面図をFig.1に示した。

巻き戻しコイルは二つのコイルを同方向に巻き、互いに接続したものである。巻き戻し構造をもつ1次コイルは系統へ接続し、2次コイルは短絡した。この構造は、2次側コイルのインダクタンスを小さく保ちつつ、大きな抵抗を得ることが可能である。さらに、二つのコイルの磁束を打ち消すことによりある程度2次側に発生する常電導抵抗とインダクタンスを独立して決定できるという利点を持つ。設計製作した限流器は、2次側発生抵抗に対してFig.2のようなインピーダンス特性を持つ。待機時 0.028Ω 、限流時 0.089Ω 、 $\omega L_2=0.013\Omega$ である。

3. 実験回路と結果

この構造を持つ超電導限流器の基礎特性を調べるため実験を行った。実験回路をFig.3に示す。この実験においてスイッチを閉じた際の回路に流れる電流 I_{cir} 、電圧 V_{cir} 、限流器にかかる電圧 V_{fcl} 、2次側コイルの電流 I_2 を計測した。

この結果より、 I_2 が2次側コイルにおいて抵抗が発生する際の電流値(100A)では明確な限流効果は得ることができず、その電流値の2倍程度の電流で効果が顕著になった。

明確な限流効果が観察された実験結果の一例をFig.4に示す。限流器なしでは回路電流ピーク値が180Aとなるところを130Aに限流している。この時の限流インピーダンスを概算すると 0.075Ω となり、Fig.2から推定すると2次側コイルの常電導抵抗は ωL_2 の2倍程度発生していることになる。

参考文献

[1] K.Fushiki, T.Nitta, and J.Baba, "Conceptual Design for Transformer Type SC-FCL by use of Silver Sheathed BSCCO Wire" 7th European Conference on Applied Superconductivity on Volume 43, pp.971-974, 2006

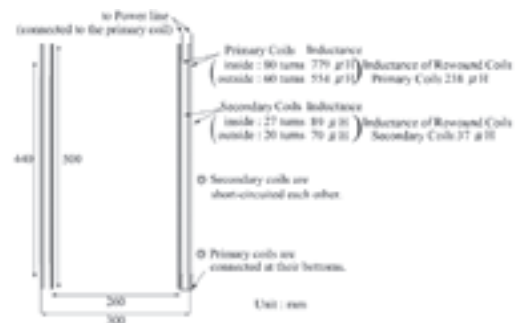


Fig.1 Cross section of SCFCL having rewound structure

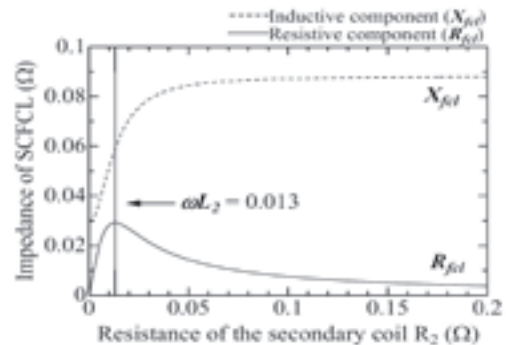


Fig.2 Impedance of the designed SCFCL for normal resistance of secondary coil

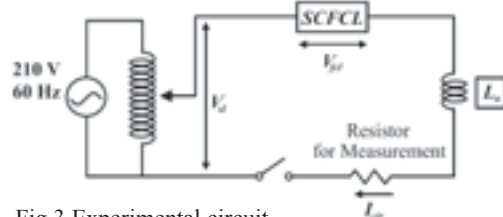


Fig.3 Experimental circuit

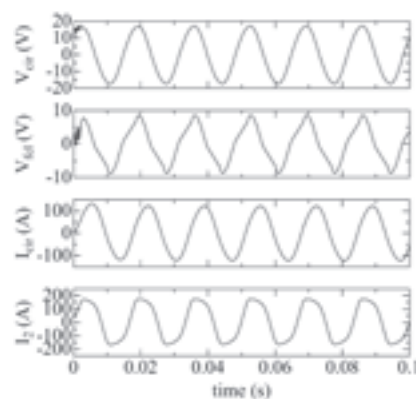


Fig.4 Wave form of V_{cir} , V_{fcl} , I_{cir} , and I_2 in case that the peak of exceeded the critical current

100MW-54MJ 級系統安定化 SMES 用 HTS コイルシステムの概念設計

Design of HTS coils for 100MW-54MJ class power-system-stabilizing SMES

沖津 茂樹, 木戸 修一, 竹内 一浩 (日立製作所); 刀俣 浩一, 林 秀美 (九州電力)

SHIGEKI Okitsu, SHUICHI Kido, KAZUHIRO Takeuchi (Hitachi, Ltd.);

KOUICHI Tone, HIDEMI Hayashi (Kyushyu Electric Power Co.,Inc)

E-mail:shigeki.okitsu.pq@hitachi.com

1. はじめに

NEDO 委託事業「超電導電力ネットワーク制御技術開発プロジェクト(フェーズ3)」では、高磁場酸化銅系高温超伝導体を用いた 100MW 系統安定化制御用 SMES システムの低コスト化研究に取り組んできた。本稿では、上記プロジェクトで開発された Y 系導体の評価結果に基づく、高磁場下の電磁力を考慮したコンパクトで経済的なコイルとクライオスタットの概念設計結果を報告する。

2. 設計検討方法

コイル仕様は蓄積エネルギー108MJ、最大経験磁場 10T、コイル平均電流密度 $35\text{A}/\text{mm}^2$ とし、コイル構造は、変換器定格電流及び電流リード耐電圧より、コイルユニット3並列システムとした。導体はハステロイ基板に $1\mu\text{m}$ の YBCO 超伝導層を有するテープ線材($I_c=800\text{A}@20\text{K}$)の複合化導体とした。

本検討でのコイル構造の設計手順は、以下の通りとした。

- ①コイル構成及び平均電流密度を設定
- ②最適コイル形状計算(コイル体積[導体+構造物]最小)
- ③経験磁場垂直成分計算
- ④導体構成検討(運転電流 $I_{op}=(\text{導体 } I_c)/2$ と仮定)
- ⑤コイル内支持構造材割合算出
- ⑥電磁力評価(フープ力、軸圧縮力、向心力)
- ⑦設計成立性を有するコイル形状の選定

ここで、コイルの磁場配位はテープ線材が磁場特性の異方性を有することから、臨界電流低下に大きく影響する垂直磁場成分の抑制効果が期待でき、結果的に必要導体長が低減できるトロイド配置とした。また、電磁力評価における設計基準応力は ASME 規格を基本とし、低温強度の増加を考慮した。

クライオスタット及び冷凍機システムの構造は、上記検討で決定したコイル構造に基づき、各支持構造及び熱侵入量(輻射、伝導熱、ヒステリシス損失等)から検討した。

3. 概念設計検討

コイル形状のパラメータサーベイ結果を Fig.1 に示し、コイル諸元の設計例を Table1 に示す。Fig.1 から、要素コイルの中心半径はコイル体積 V が最小となる 0.5m とした。このとき、総テープ線材長は 338km となり、コイルが受けるフープ力は 12MN となる。

このコイル形状に基づいたクライオスタットを含むコイルシステムの概念設計結果の外観を Fig.2 に示す。クライオスタットの寸法は直径 4.10m 、高さ 2.02m とした。クライオスタットは冷凍機冷却の無冷媒運転として、液溜め用の容器を設置せず、輻射シールド板と断熱真空容器から成る構造とした。断熱真

空容器の重量は材質を SUS304 とした場合、約 4トン と見積もられる。また、コイルを含めた低温系部材の総重量は約 35トン となる。運転待機時のコイル系(20K)への熱侵入量は 7.2W と見積もった。

4. まとめ

高磁場酸化銅系導体(Y 系)を使用した 100MW 級系統安定化 SMES 用 HTS コイルシステムについて、機械的強度、熱侵入の面で成立しつつ、コスト低減(導体長最小)を考慮した設計の一例を示した。

本検討は、NEDO 委託事業「超電導電力ネットワーク制御技術開発」に関連して実施したものである。

5. 参考文献

- [1]沖津茂樹 他;2006 年度秋季 低温工学・超電導学会, 2P-p32

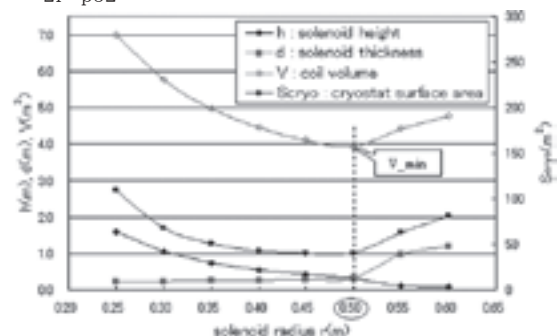


Fig.1 Parameter Survey curves of HTS SMES coil.

Table1 Design summary of HTS coils.

Design parameter	Specifications
Field placement	Toroidal (12coils)
HTS conductor	IBDA/CVD-YBCO tape
Current density	$35\text{A}/\text{mm}^2$
Solenoid radius (r)	0.500m
Solenoid thickness (d)	0.320m
Solenoid height (h)	0.324m
Coil volume (V)	3.90m^3
Cryo surface area (S_{cryo})	39.4m^2
Cryo radius_min	1.93m
5Gauss line (r, z)	3.5m, 1.7m
Operating temperature	20K

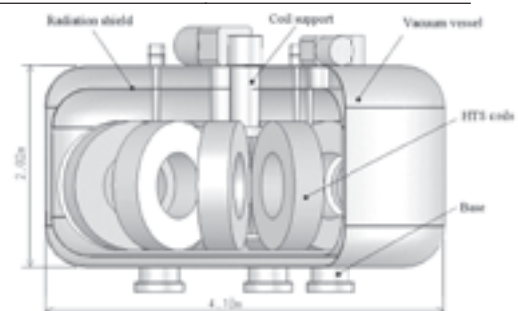


Fig.2 Overview of system stabilizing HTS SMES.

6.6kV 三相超電導限流器の開発 (3) 評価試験結果

Design and Experimental Results of Three-Phase Superconducting Fault Current Limiter(3)
Experimental Results

高橋 政彦, 矢澤 孝, 小柳 圭, 小野 通隆, 酒井 正弘, 瀧上 浩幸, 浦田 昌身(東芝); 齋藤 隆(フジクラ);
雨宮 尚之(横浜国大); 塩原 融(ISTEC-SRL); 石橋 悠, 伊藤 俊之(東京ガス)

TAKAHASHI Masahiko, YAZAWA Takashi, KOYANAGI Kei, ONO Michitaka, SAKAI Masahiro, TAKIGAMI Hiroyuki,
URATA Masami (Toshiba Corporation); SAITO Takashi (Fujikura Ltd.); AMEMIYA Naoyuki (Yokohama National Univ.);
SHIOHARA Yuh (ISTEC-SRL); ISHIBASHI Yu, ITO Toshiyuki (Tokyo Gas Co., Ltd.)

E-mail: masahico.takahashi@toshiba.co.jp

1. はじめに

経産省プロジェクト「超電導応用基盤技術研究開発」の中で超電導限流器要素技術開発に取り組んでいる。前報(連番(1))では、健全性を確認した三相分のコイルをクライオスタットに組み込み、さらに遮断器・検出系・シーケンス系と組合せ、6.6 kV 三相超電導限流器を構成したことを述べた。ここでは、この三相超電導限流器の短絡試験及び系統連系試験について報告する。

2. 短絡試験

三相超電導限流器を短絡発電機と組合せて3線地絡事故と2線短絡事故を模擬した限流試験を実施した。まず三相限流器組立て後に対地及び相間で、交流 22 kV × 1 分間の耐電圧を確認した。その後、GM 冷凍機とヒーター制御により 70 K に、ヘリウムガス加圧により 100 kPa に保持した液体窒素を用いてコイルを冷却した。Fig. 1 に印加電圧が 6.6 kV で3線地絡事故を模擬した短絡試験の結果を示す。このケースでは 8.7 Ω の抵抗が発生し、1560 A の事故電流を第1波で 840 A (54%)に抑制することに成功している。また、この時の電流波形はシミュレーション結果ともよく一致する。また、2線短絡事故を模擬した試験でも同様の結果が得られている。今回は、限流器盤としてのシーケンスも試作したが、これも設計どおり機能した。この短絡試験終了後に三相コイルの健全性確認のための交流損失測定を各相毎に実施し、各相とも事前測定結果(3.5 W at 70 A)と変化はなく、大きなコイル劣化がないことを確認した。

3. 系統連系試験

つぎに三相超電導限流器を東京ガス・千住テクノステーションの試験フィールドに持ち込み系統連系試験を行った。

まず自家発電機と繋ぎ、自立運転による定格通電を確認した。Fig. 2 左側に自立運転での系統図を示す。自家発電機を起動し、超電導限流器を介して模擬負荷に接続し、自立運転定格である 6.6 kV, 66 A まで出力を上昇した。この時の電圧・電流波形を Fig. 2 右側に示す。合計で 25 時間の通電を行ったが、電圧・電流波形、冷媒の温度変化(0.1 K 以下)、気相の圧力変化(2 kPa 以下)とも安定に推移し、システムの健全性を確認することができた。

次に、2月中旬より商用系統と接続し、連系運転(定格 6.6 kV, 72 A)を開始した。Fig. 3 に試験結果の一例を示す。本試験においても、自立運転試験と同様に、限流コイル、クライオシステムともに良好な動作状態を確認することができた。

4. まとめ

6.6 kV 三相超電導限流器を構成し、短絡試験及び系統連系試験を実施した。短絡試験では 6.6 kV の3線地絡のケースで 1560 A の事故電流を第1波で 840 A (54%)に抑制することに成功した。また、商用系統との連系を実施し、安定して通電できることを確認した。この結果は、次世代線材を用いた超電導限流器の実用化に向けた大きな前進と考えられる。

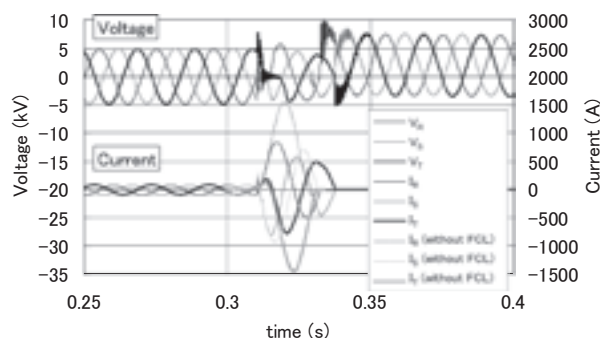


Fig.1 Current and voltage waves obtained from short circuit experiment.

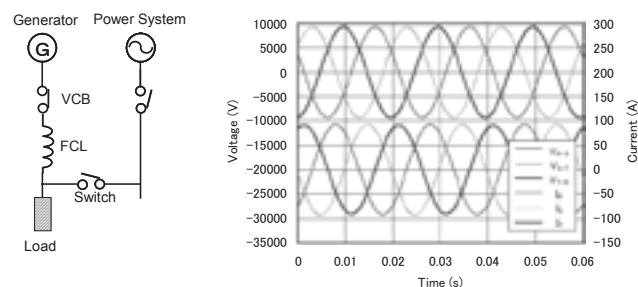


Fig.2 Diagram of long term operation in a user field and one of experimental results.

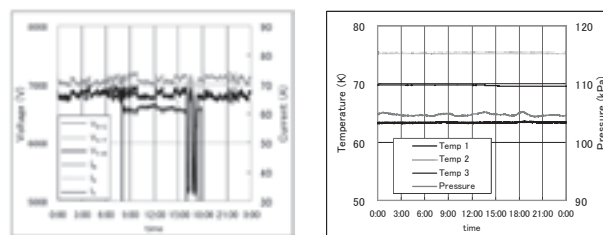


Fig.3 One of the experimental results of long term operation in a user field. (a) Current and voltage (b) Temperature and pressure.

謝辞

本プロジェクトは、経済産業省プロジェクト「超電導応用基盤技術研究開発」の一環として、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から委託を受けて実施したものである。

参考文献

1. T. Yazawa, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.112
2. K. Koyanagi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.113

ミアンダ形金保護膜を持つ超電導薄膜限流素子の限流試験 Experimental Study on a Superconducting Fault Current Limiting Element with a Meander-shaped Gold Layer

野中 壮平, 関野 正樹, 大崎 博之(東京大学)

NONAKA Sohei, SEKINO Masaki, OHSAKI Hiroyuki (The University of Tokyo)

E-mail: nonaka@ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

本研究は、超電導薄膜を直接、限流抵抗として利用する抵抗型限流器を対象としている。この限流器の実用化に向けての課題の一つは素子の大容量化である。その中の高電圧化を考えると、薄膜を長くして限流時の発生抵抗を大きくする方法が基本であるが、その方法を応用した限流素子として我々が提案しているのは、基板全体に作製された超電導薄膜の上にミアンダ形金保護膜を作製した限流素子である[1]。この素子は、通常時は超電導層全体を電流が流れ、限流時には金保護膜に分流した電流がミアンダ形に流れるため発生抵抗が大きくなり、電流量を損なわず、高電圧化を達成できる点に特徴がある。これまで数値解析によってこの素子の有効性を示してきたので、ここでは実験による動作検証を行うことにした。

2. 実験の概要

本実験では超電導薄膜に $YBa_2Cu_3O_x$ (YBCO) 薄膜を用いており、Fig.1 に示す試料 A、B の二つの試料で実験を行った[2]。試料 A についてはミアンダ形金保護膜の最小単位となる中央部のみで限流試験を行った。実験では Fig.2 に示す回路を用い、電圧を印加したときに薄膜を流れる電流波形、及び各電圧端子間の電圧波形を観測した。電圧端子について、試料 B では膜の両端を V(2,11)、中央部を V(6,7) のように Fig.1(b) の端子番号の組み合わせで各部の電圧を観測した。

3. 実験の結果

試料 A 及び B において限流動作を確認することができた。試料 A では、電流が約 170 A に上がったところで限流を開始した。一方、試料 B は、超電導薄膜の幅が試料 A と等しいのでほぼ同じ電流値で限流が起きたが、常電導転移する箇所が膜の中央付近に集中し、さらに電圧を上昇させるのが困難であった。ここでは、両端の電圧 V(2,11) のほぼ全てが中央部の電圧 V(6,7) に集中していることや、限流時に発生するあぶくの出る場所から、膜の中央部で最初に局所的な常電導転移が起きていることを確認している。この原因として、超電導薄膜の臨界電流密度 J_c に不均一性があるため、 J_c が周囲に比べ低い部分で局所的な常電導転移がまず起きてしまい、長さ方向の広がりを利用できていなかったと考えられる。

4. まとめ

今回の限流試験により、実際に限流動作を観測することはできたが、 J_c の均一性や電極部の接着の強さや大きさなど、YBCO 薄膜や接続部などで改善が必要な点が明らかになった。今後は、数値解析も併用して、実験での限流過程を詳細に調べ、それに基づいて再度、限流素子を設計、作製して、限流特性の向上を目指していく予定である。

参考文献

- [1] 一木洋太, 大崎博之: 2006年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, p.101
[2] I. Yamaguchi, T. Maeda, M. Sohma, K. Tsukada, W. Kondo, K. Kamiya, S. Mizuta, T. Kumagai: *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 15, no. 2, pp. 2927-2930, 2005.

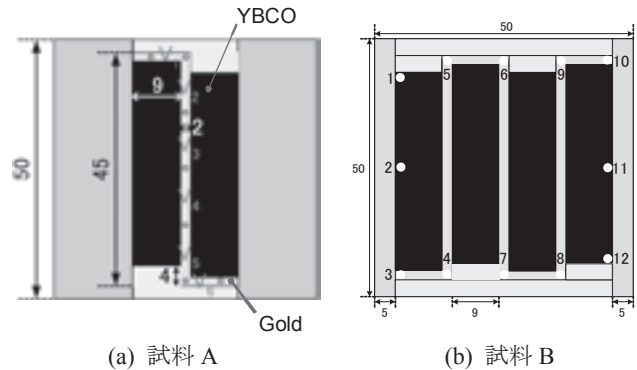


Fig. 1 Fault current limiting elements used in the experiment

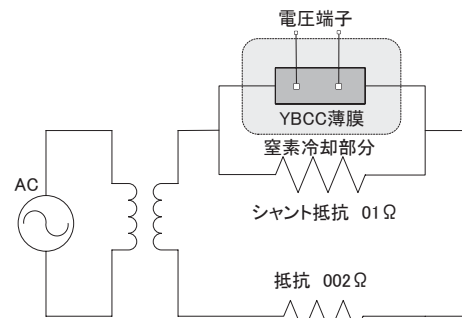


Fig. 2 An electric circuit for fault current limiting experiment

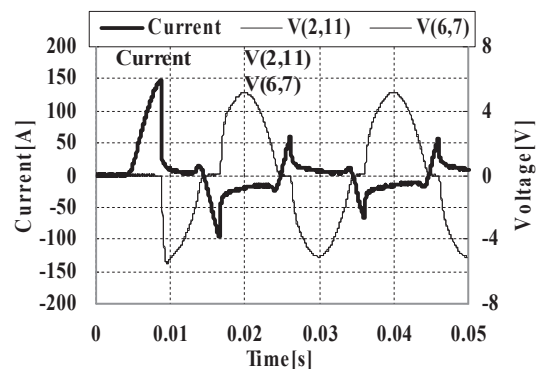
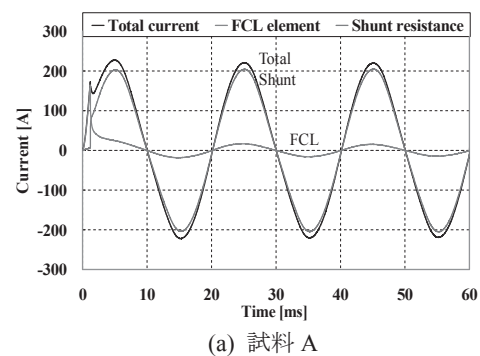


Fig. 3 Current and voltage waveforms

(RE)BaCuO バルク超電導体を適用した同期モータ回転子の基礎検討 Basic study of a synchronous motor rotor using (RE)BaCuO bulk superconductors

鈴木 達矢, 関野 正樹, 大崎 博之(東京大学)

SUZUKI Tatsuya, SEKINO Masaki, OHSAKI Hiroyuki (The University of Tokyo)

E-mail: suzuki@ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

高効率化、高出力密度化が期待される超電導回転機は、電気推進船や全電気式航空機、風力発電などへの適用が検討されている[1,2]。本研究では、(RE)BaCuO バルク超電導体と高温超電導コイルを併用することで強い界磁磁束を実現する同期モータの検討を行っている。本稿では、界磁磁束について有限要素法による解析を行った結果を報告する。

2. 解析モデル

瓦形状のバルク超電導体を磁気遮蔽材として使用することを考え、内半径 45mm、外半径 55mm、角度 45°、幅 42mm を仮定する。ここでは単純に等方性磁性体(比透磁率: 10^{-5})で近似してバルク超電導体の反磁性を考慮する。超電導コイルの電流密度は $200\text{MA}/\text{m}^2$ とし、2 つのコイルには互いに逆向きに電流を流す。Fig.1 に解析モデルを示す。バルク超電導体がある円筒面の外側に電機子巻線が配置されることを想定して、コイルの発生する磁束がバルク超電導体により遮蔽される部分と外側へ出る部分が回転方向に交互に繰り返すことにより、8 極のモータの回転界磁となる。今回は、バルク超電導体がない場合の二次元有限要素法解析と、バルク超電導体を置いたときの三次元有限要素法解析を行った。

3. 解析結果および検討

二次元解析結果を Fig.2 と Fig.3 に示す。まず、コイルの巻線断面形状を固定、つまりコイル幅が 20mm、厚さ a が 20mm とし、コイル間隔を 62mm(コイルとバルク間のギャップ g が 10mm を想定)として、コイルの内半径 b を変化させたときの、 $z=0$ 、 $r=60\text{mm}$ における径方向磁束密度 B_r と、コイルの最大経験磁束密度 B_{max} を Fig.2 に示す。 $b=35\text{mm}$ のとき、コイル外径がバルク超電導体外径に一致する。また Fig.3 は、コイル外径を 55mm に固定し、コイルの厚さ a を変化させたときの B_r と B_{max} を表す。二次元解析の結果より、 $a=20\text{mm}$ 、 $b=35\text{mm}$ で、コイルの外周をバルクの外周と一致させたとき B_{max} が 1.93T と比較的小さく、電機子付近の磁束密度が 0.328T となる。このパラメータ条件で三次元解析を実施した。

Fig.4 は、バルク超電導体が置かれた場合の三次元解析結果である。 B_r の z 方向分布を調べたものであり、バルクとコイルの間のギャップ g を 0、2、5、10mm に変化させた。 $g=10\text{mm}$ のとき B_r は小さくなってしまいが、5mm 程度以下にすれば $z=0\sim 20\text{mm}$ での磁束密度の低下を抑制できることがわかる。

4. まとめ

磁気遮蔽材としてのバルク超電導体と超電導コイルの組合せで発生する同期モータ界磁の基礎検討を、二次元および三次元有限要素法解析により行った。今後は、超電導コイルやバルク超電導体の形状や界磁磁束分布の詳細検討、電機子構造やモータ特性などの解析、検討を行っていく予定である。

参考文献

- [1] P. J. Masson, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 15 (2005) pp.2226-2229
- [2] C. Lewis, et al.: IEEE Power Engineering Society General Meeting, (2005) pp.1-8

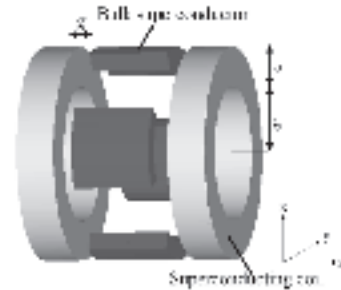


Fig. 1 FEM analysis model

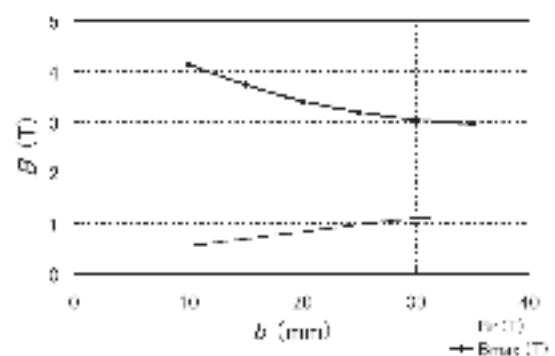


Fig. 2 Dependence of flux densities, B_r and B_{max} , on the inner radius b of the coils (2D FEM analysis)

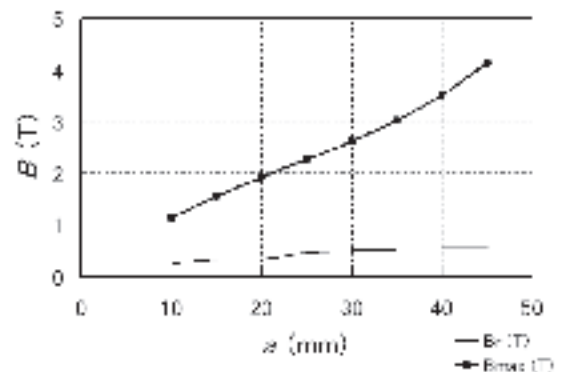


Fig. 3 Dependence of flux densities, B_r and B_{max} , on the coil thickness a (2D FEM analysis)

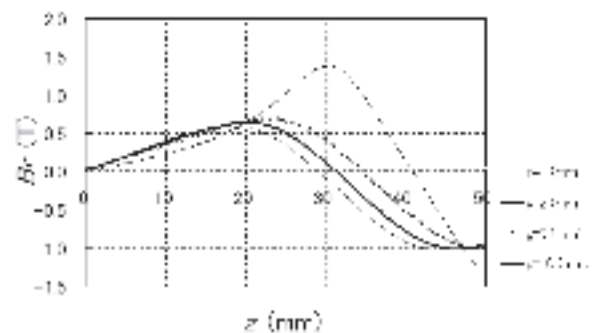


Fig. 4 Dependence of $B_r - z$ curve on the gap g (3D FEM analysis)

不均一磁界中における超電導三本並列導体の交流損失

AC loss in transposed three parallel SC conductors with magnetic field distribution

中村 章, 永吉 広樹, 岩熊 成卓, 船木 和夫 (九州大学)

NAKAMURA Akira, NAGAYOSHI Hiroki, IWAKUMA Masataka, HUNAKI Kazuo (Kyushu University)

E-mail: niinya@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

我々は大電流量酸化超電導体の構成法として、素線を用いて巻線を行い、その途中で転位を施す方法を提案している。本研究はこの並列導体に不均一な外部磁界を印加した場合に、並列導体に流れる遮蔽電流が素線の臨界電流値に達しない非飽和条件下、達する場合の飽和条件下に分けそれによって発生する付加的交流損失を定量的に明らかにしている。今回は三本並列導体について解析を行っている。

2. 並列導体の基礎方程式

図1は両側共に転位位置が最適転位位置から Δl ずれた場合の三本並列導体及び、今回想定した磁界分布の図である。このように転位位置のずれがあると並列導体に磁束が鎖交し、それを打ち消すように遮蔽電流が発生する。その遮蔽電流が素線の臨界電流値に達しない場合の、非飽和条件下の式は次式となる。

$$I(t) = -\frac{w}{K} \frac{\Phi_{B(x)}}{2\mu_0 L_0} \frac{\omega\tau}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} \sin(\omega t + \phi)$$

このときの付加的交流損失は

$$W = \int_0^T \frac{2RI^2}{3uwL} dt$$

より求めることができる。

ここで d_s は素線の中心間距離、 w 及び u は線材幅及び厚さ、 $\Phi_{B(x)}$ は鎖交磁束である。

また、飽和条件下における損失の式は次式より求められる。

$$W = \frac{8d_s I_c}{3uwL} \left(\Phi_{B(x)} - K \frac{\mu_0 L_0}{w} I_c \right)$$

3. 解析結果

図2に B_m を0.2T、周波数を10Hzに固定して $\Delta l/L$ を動かした場合、図3に $\Delta l/L$ を0.167、周波数を10Hzに固定して B_m を動かした場合の付加的交流損失の解析結果を示す。この結果は我々がこれまで行ってきた、二本並列導体の付加的交流損失と同じような特性を示している。具体的には、非飽和条件下では、付加的交流損失は、 B_m 、 Δl の2乗に比例し、飽和条件下では B_m 、 Δl に比例していること。 n が大きくなるほど一様磁界の損失に近づき、 $n=3$ 程度で、ほぼ一様磁界と近似できる。ということである。ただし、図2において転位のずれが最大付近になると各磁界分布で差が出てくるが、これは並列導体の両端では、一様磁界以外は非常に小さくなるためである。

4. まとめ

本解析によって三本並列導体において、両側共に Δl だけ転位位置がずれている場合については、二本並列導体と同じような特性を示すことを明らかにすることができた。今後は、片側だけがずれている場合についても、理論式を導出し考察を行っていきたい。

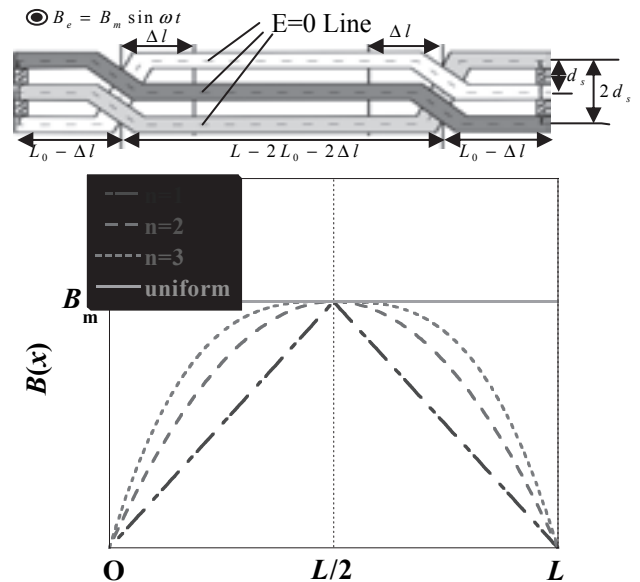


Fig.1 Three parallel conductors and Magnetic field distribution

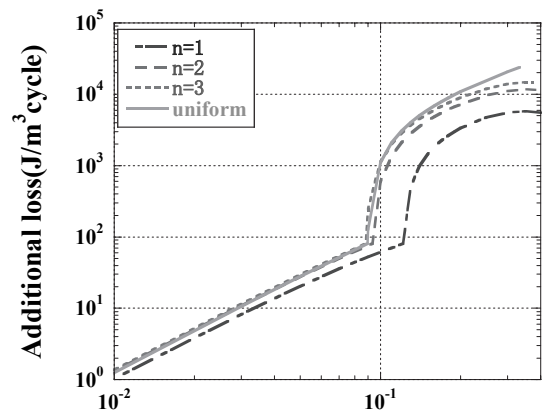


Fig.2 The gap from the best transpose position dependences of the Additional loss

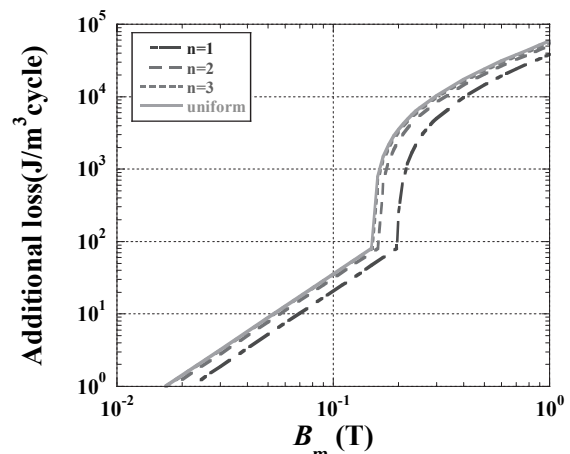


Fig.3 B_m dependences of the Additional loss

多層コイルに巻かれた超電導並列導体の電流分流特性

Study on the current branch characteristic of transposed parallel conductors rolled in superconducting multilayer coil

香月 良太, 永野 正樹, 岩熊 成卓, 船木 和夫 (九州大学)

KATSUKI Ryota, NAGANO Masaki, IWAKUMA Masataka, FUNAKI Kazuo (Kyushu Univ.)

E-mail:katsuki@sc.kyushu-u.ac.jp

1 はじめに

酸化超電導線を電力機器の巻線や大型超電導マグネットに適用するためには大電流容量化が必要となる。現在の酸化超電導線材は、結晶の配向性を向上させるためにテープ状に加工されているため、その大電流容量化の具体的な手法は並列導体の構成である。しかし単に積層しただけでは自己磁界効果により電流偏流が生じてしまうため、適切な位置で素線の位置を入れ替える転位を施して電流分流を均等にする必要がある。そこで我々は、並列導体をソレノイドコイルに適用する際に、図1に示すような各層間において転位を行う層間転位を提案し、各素線の電流分流比を均等にする転位方法について検討してきた。しかし、設計上の寸法などの制約がある場合は、最適転位に必要な層数から増減させざるを得ず、その場合の電流分流比は均等とならない。その対策として最外層において層内転位を行うなどの方法をとってきたが、これには決まった法則性がなく、層数によっては補正方法を見つけるのが困難であった。そこで、層間に加えて層内でも転位を施すことにより、層数や素線数に依らず電流分流を均等にしようとする最適転位方法について検討を行った。これまでの研究で図2のように様々な素線数における転位方法のパターン化が確立できたので今回は実際に素線数 3 本の場合における転位コイルの作成を行った。

2 電流分流比の計算

超電導状態では、抵抗が無視できるので、電流分流比はインダクタンスバランスのみで決まる。ここでは、各素線1ターンを1つのインダクタンスとして、各ターン間の自己インダクタンス及び相互インダクタンスを算出し、回路方程式より電流分流比を計算した。

3 コイル形状変化及びずれ幅に対する依存性

今回の解析はコイルがすべて密巻であると仮定して計算したものであるが、実際に層内で転位した場合は巻線の位置にずれが生じることも想定される。そこで、転位位置で素線の位置にずれが生じた場合の、電流分流比への影響についても検討を行った。

4 考察

今回、NbTi 平角多芯線を使用して実際に素線数 3 本層間・層内転位コイルを作成し実験を行ったが、図3のように理論値とは若干のずれが生じた。この原因としては、コイル作成の際、巻線機を用いて手作業で転位を行ったため巻き乱れが生じたことや、使用した線材の劣化などが考えられる。今後、多層ソレノイドコイルをより簡単に精度良く作成する方法を考える必要があると思われる。

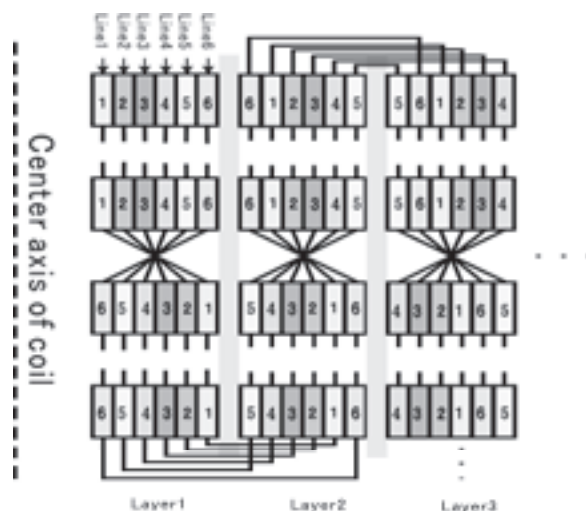


Fig.1 Transportation method to compensate the current distribution of the case of six

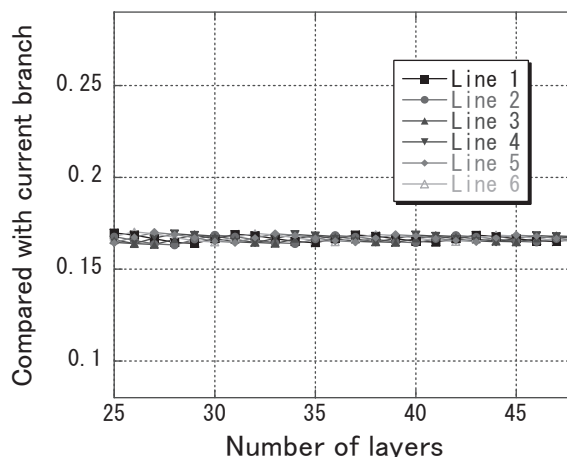


Fig.2 The current distribution with compensation of the six

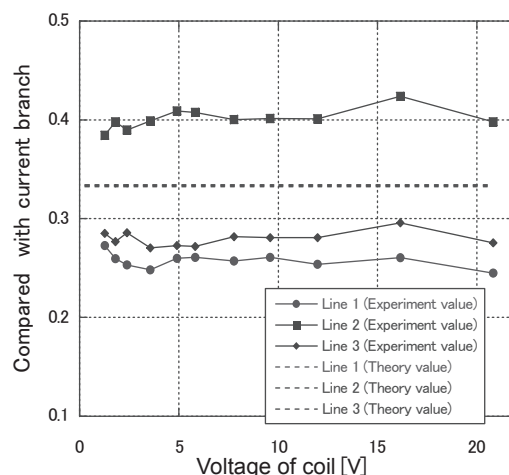


Fig.3 Result of experiment value and theory value of the three

円環状剣山熱交換器によるサブクール液体窒素の自然循環

Natural Circulation of Sub-cool Liquid Nitrogen using Multiple-Pin Circular-Plate Heat Exchanger

池田 和也, 長嶋 賢, 宮崎 佳樹, 岩松 勝(鉄道総研);

IKEDA Kazuya, NAGASHIMA Ken, MIYAZAKI Yoshiki, IWAMATSU Masaru (RTRI);

E-mail: k-ikeda@rtri.or.jp

1. はじめに

鉄道車両用超電導主変圧器冷却システム開発において、サブクール液体窒素の充填されたクライオスタット中で、交流損失により発熱する HTS コイルを冷却する方法については、既報の 100W 級熱負荷基礎実験装置によって小規模な検証試験を実施している[1]。この時は GM 冷凍機のコールドヘッドに剣山熱交換器を接触させ、冷凍機により冷却されたピン周辺のサブクール液体窒素の下降流と、模擬コイルの発熱による上昇流が生み出す自然循環で、100W 程度であれば冷却が可能であることを検証した。

鉄道総研で開発中の HTS 主変圧器の交流損失は 1kW 相当が見込まれており、そのため 1kW 級の冷凍能力を有するパルス管冷凍機を開発してきた[2]。

今回、これらの成果をふまえ、剣山状ピンを円環状に配して構成した大型の熱交換器と 1kW 級パルス管冷凍機を組み合わせ、熱交換検証試験を実施したので報告する。なお、実験に先立ち、装置と同様の解析モデルによる数値解析を実施したので併せて報告する。

2. 解析モデルと数値解析条件

解析モデル（装置概略図）を Fig.1 に示す。上部の円環状熱交換器（薄い灰色）の中心部③にパルス管冷凍機のコールドヘッドがあり、65K に保持されている。但し、ここには冷凍機形状は記載されていない。図の濃い灰色部分は液体窒素で満たされており、図中の丸数字は Fig.2 の熱電対と対応している。熱交換器ピン形状はピン径 $\phi 4\text{mm}$ 、ピン長さ 50mm で実験装置と同様としている。

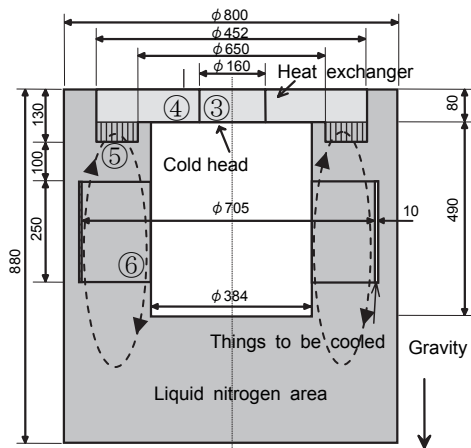


Fig.1 Numerical analysis model

3. 解析結果

冷凍機冷端部 65K 一定、被冷却体 1kW 負荷時の解析結果より次のことが示唆された。

- ① 冷凍機の冷端部からピン間の距離が長く、熱流速が大きいので、Al の熱抵抗によって冷端部 65K に対してピン先端部は 69.5K まで上昇することが分かった。
- ② 低温流体は Fig.1 中の点線で示したように熱交換器ピン部中心より若干内筒側の部分から装置下部に流れ、コイル模擬ヒータを冷却しながら上昇していることが明らかになった。

4. 解析値と実験値の比較

解析モデル Fig.1 における④～⑥の温度分布と、実負荷装置による同部位の温度分布比較を Fig.2 に示す。実負荷試験では、600W で一部の温度が沸点近くまで上昇してしまい、解析結果との照合が困難になった。原因は、冷凍機冷端部と円環状熱交換器の熱接触抵抗増が考えられる。しかし、解析値と実験値の負荷に対する割合（解析値／実験値）はほぼ同じであり、解析結果の妥当性を示唆しているものと考えられる。

実機となる主変圧器冷却システムにおいては、大容量熱交換器の冷凍機への接続について、熱接触抵抗低減策をさらに検討していかなければならないことがわかった。

なお、本解析、実験は国土交通省の国庫補助金を受けて行ったものである。

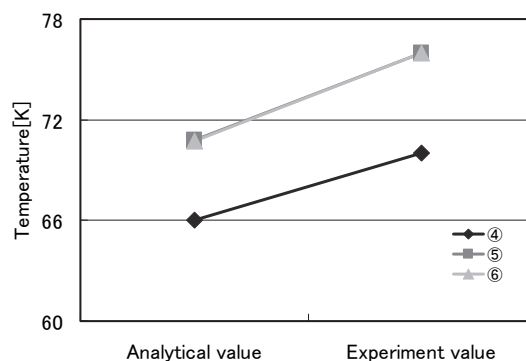


Fig.2 Comparison between analytical and experiment values

参考文献

1. K.Ikeda, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 67(2002)p182
2. K.Ikeda, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 74(2006)p146

C-PREST(ダイナミックシミュレータ)による冷却プロセスの検討

Refrigeration Process Analyses Utilizing Cryogenic-Process REal-time SimulaTOR

前川 龍司, 大場 恒揮, 鷹見 重幸(NIFS); 信時 実(大陽日酸)
 MAEKAWA Ryuji, OBA Kouki, TAKAMI Shigeyuki(NIFS); NOBUTOKI Minoru(TAIYO-NISSAN)
 E-mail: maekawa.ryuji@lhd.nifs.ac.jp

1. はじめに

C-PREST は大型低温システムのダイナミックな挙動を把握し、運転方法最適化、緊急時におけるシーケンスプログラムの検証などのために開発された。これまで、10kWクラスのヘリウム液化冷凍機のダイナミックシミュレーションをおこない、実機との比較から実行速度及び精度に関しては検証済みである[1]。今回は前モデルを更に発展させ、LHD低温制御システム全体をモデル化し、室温からの液体ヘリウム温度までの冷却過程を模擬した。さらに、ダイナミックシミュレータをMATLABとリンクさせ、中型ヘリウム液化機モデルを利用した制御方式(PID, Feed Forward 等)について検証したので報告する。

2. C-PREST

C-PRESTはFig. 1に示すように、VMEボードとプログラミング用PC、そしてダイナミックプロセス計算用PCから構成されている。先進的な制御方法について検討するために、ヘリウム液化冷凍機用PCにMATLABの機能をリンクさせ、プロセス計算用PCでの冷凍機を制御することが可能になっている。また、今回モデル化したLHD低温システムの概略のフロー図をFig. 2に示す。モデル化は超伝導コイルシステムと電磁力支持構造物及び熱輻射シールドについておこない、予冷時に負荷の少ない超伝導バスラインシステムは省略してある。このモデルについて室温からの冷却及びヘリウム液体貯槽へおよそ3kWの熱をパルス的に入れた場合の挙動について検討をおこなった。

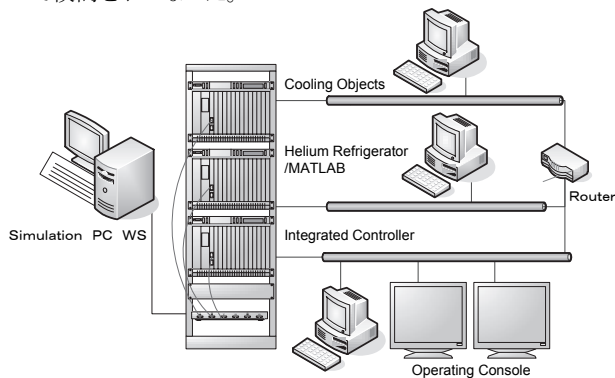


Fig.1 Illustration of C-PREST

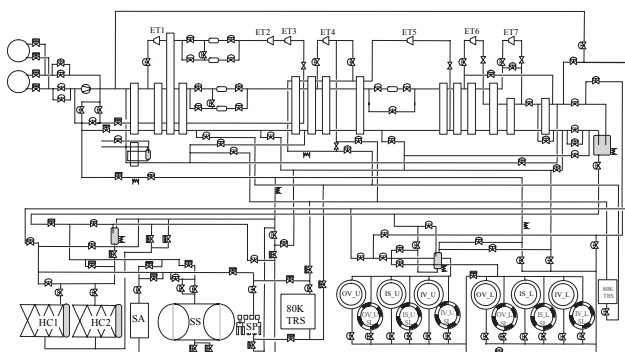


Fig. 2 P&ID of LHD cryogenic system

3. 中型ヘリウム液化機を利用したプロセス解析

Fig.3 は中型ヘリウム液化機のモデルである。ダイナミックな挙動を把握するために、液体ヘリウム貯槽にヒートパルス、約280W、10秒を加えた。Fig. 4上部のグラフはPID制御によるシステムの挙動であり、上記の様な擾乱を想定していないために、圧力振動をうまく抑制することができない。そこで、FF制御を利用し圧縮機側の調節弁で、システムの安定性向上を確認した結果が、Fig. 4の下部のグラフである。貯槽への熱入力に速やかに反応し、システムの圧力振動を抑制していることが分かる。

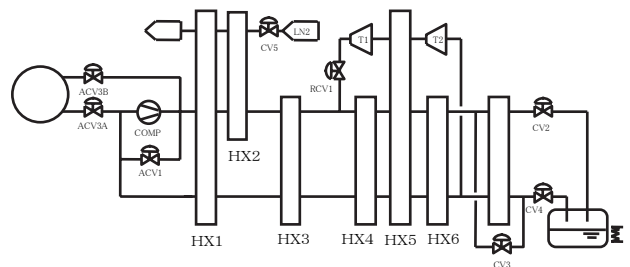


Fig. 3 P&ID of 300W class helium liquefier

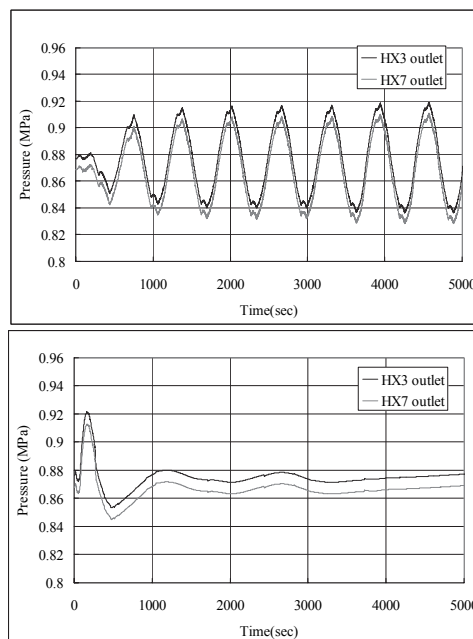


Fig. 4 View graphs compare the pressure change after the 280W, 10sec heat pulse input to the liquid helium reservoir.

各ダイナミックシミュレーションの詳細については、当日報告する。

参考文献

1. R. Maekawa, et al.: Cryogenics, Vol. 45 (2005) p.199

サーチコイルを用いた機械的擾乱発生位置評定法の実験的検討

Test Measurement of the Mechanical Disturbance Position in a Superconducting Magnet Using Search Coil

青木 学、山田 喜美雄、松井 祐二 (日立・電開研)

AOKI Manabu, YAMADA Kimio, MATSUI Yuji, (Power & Industrial Systems R & D Laboratory, Hitachi)

E-mail: manabu.aoki.ek@hitachi.com

1. 緒言

超電導コイルのクエンチ原因としては、コイル変位や充填樹脂の割れといった機械的擾乱が考えられる。これらの発生位置評定は、それに伴って発せられる音響放射 (AE) を複数の AE センサで測定し、それぞれの検出時間差から算出する方法が一般的である [1]。しかし、本研究では、磁場中において高感度で AE 検出が期待できるサーチコイルに着目し、それを用いた位置評定が可能かどうかを実験的に検討した。

2. 実験方法

試験体系 (Fig1) は、直列接続した試験コイル 2 個及びシールドコイル 1 個からなる。サーチコイルは、ボビン内周側に 90° ピッチで 4 個ずつ、試験コイルからの鎖交磁束が最大になるよう設置した。なお、比較検討のため AE センサもボビン外周側に 120° ピッチで 3 個設置した。

試験では、上記の試験体系に通電してクエンチを発生させ、その時ボビンを伝播する音波がサーチコイルを振動させて生じた誘導電圧を測定した。

機械的擾乱発生位置は、試験コイルの高さ方向並びに径方向の厚さが周長に対して十分短く無視できるため 1 次元近似により周方向位置を評定した。また、固体中の音速は、隣接するサーチコイルの検出時間差から求め、コイルとボビンの材質によらず一定と仮定した。

3. 試験結果と検討

試験結果の一例を Fig2 に示す。常電導転移直前にサーチコイルには電圧信号が測定され、それぞれの信号には検出時間差があった。隣接するサーチコイルの検出時間差から算出した音速は、約 2.4~3.6km/s であった。ステンレス鋼中の音速の文献値は、縦波で 5.8km/s、横波で 3.1km/s であり [2]、サーチコイルでは横波を検出していると考えられる。サーチコイルによる機械的擾乱発生位置の評定結果は、試験コイル 205° の位置であった (Fig3)。一方、AE センサによる評定結果は 159° で、双方のセンサの結果には約 50° のずれがあった。この原因はセンサ設置位置の違いと、信号立ち上がり時間の読み取り誤差が考えられる。

4. 結言

機械的擾乱によって発生する AE を複数のサーチコイルで検出し、それぞれの時間差から発生位置を評定する方法を検討した。その結果、AE を感度良く検出でき、クエンチ原因となる機械的擾乱の発生位置評定に適用できる見通しを得た。

参考文献

- [1] 松井祐二他、2006 年春季低温工学・超電導学会講演概要集 1D-a07
- [2] 国立天文台編、理科年表 (平成 19 年度版)、P418

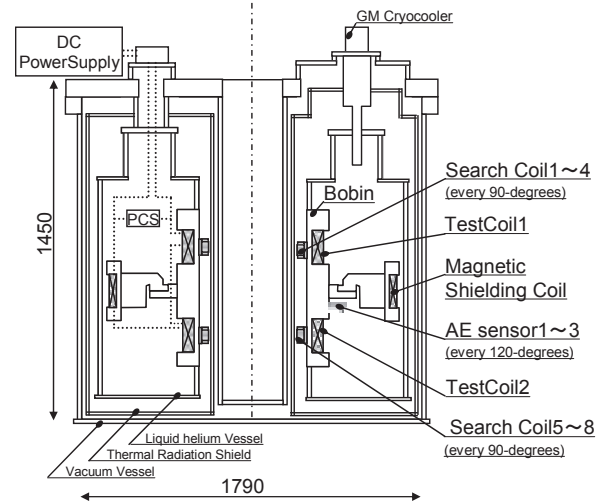


Fig.1 Experimental Setup

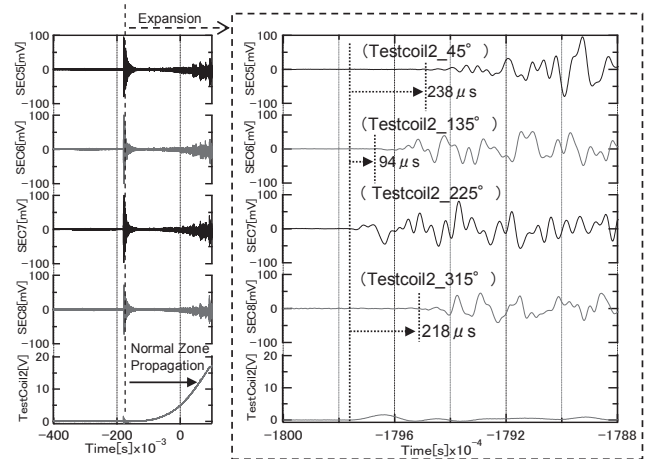


Fig.2 Waveforms of SearchCoil (SEC) and TestCoil2 Voltage (Coil Current 600A)

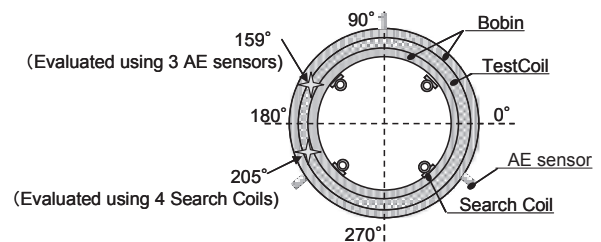


Fig.3 The evaluated positions of mechanical disturbance

SQUID による鉄道用レール診断の基礎的試験

Fundamental Examination of Rail Inspections for Railway by SQUID

宮崎佳樹, 清野 寛, 岩松 勝, 田中芳親(鉄道総研), 糸崎秀夫, 都築理志(大阪大学)
 MIYAZAKI Yoshiki, SEINO Hiroshi, IWAMATSU Masaru, TANAKA Yoshichika (RTRI),
 ITOZAKI Hideo, TSUZUKI Satoshi (Osaka Univ)
 miyazaki@rtri.or.jp

1. はじめに

鉄道用レールには、車輪との接触面に白色層(White etching layer)と呼ばれる硬化層が発生する場合がある。白色層付近には微小き裂、シェリングと呼ばれるレール傷が見られる場合があり、これらがレール頭頂面のはく離や、レール破断を引き起こすと考えられている[1]。

本研究では、白色層の検出手法として SQUID(超電導量子干渉素子)による非破壊検知手法の検討を進めている。実レール白色層を模擬した標準試験片の測定結果の報告[2]に続き、今回実レールの測定を行ったので報告する。

2. レール白色層検知試験

本報告では、測定原理に渦電流法を採用している。SQUID による渦電流探傷を、レールのような磁性体に適用した場合、レールの残留磁化が大きな直流磁気ノイズとなり、SQUID の駆動に影響を与える。本測定では残留磁化は補償回路などを組み合わせることによりキャンセルしている。また、リフトオフ(SQUID と試料との空間ギャップ)が大きく変化するレール端部(エッジ)も測定できるよう SQUID 回路の感度調整を行うことで、レール頭頂面の広い範囲の応答信号を得られるようにしている。

Fig.1 に測定に用いたレールを示す。レール頭頂面にはナイタルと呼ばれる腐食剤を塗布し、白色層が観察可能な状態にしてある。測定は、SQUID を固定してレール試料を移動させて行った。測定結果を Fig.2 に示す。

Fig.2 中に丸枠で示した A, B 部分の白色層箇所と、Fig. 2 の信号強度の強い A, B 部分の整合性は良好であり、白色層分布と測定信号がよく対応していることが確認できた。信号変

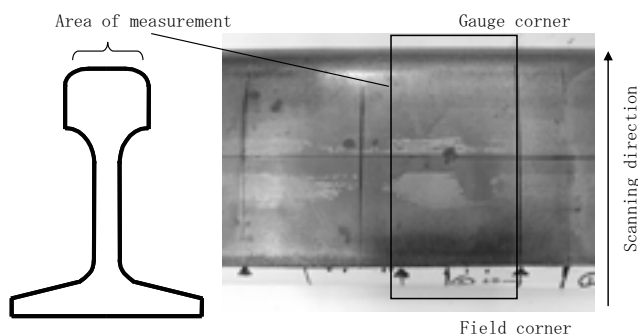


Fig.1 Scan area of white etching layer

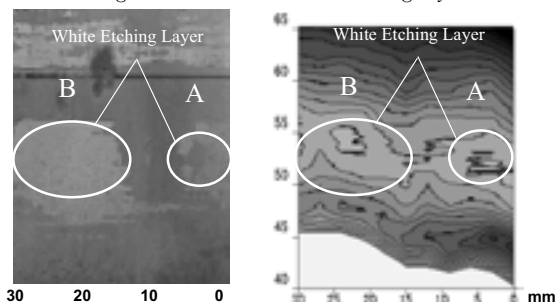


Fig.2 Result of measurement
(excitation coil: diameter 20mm)

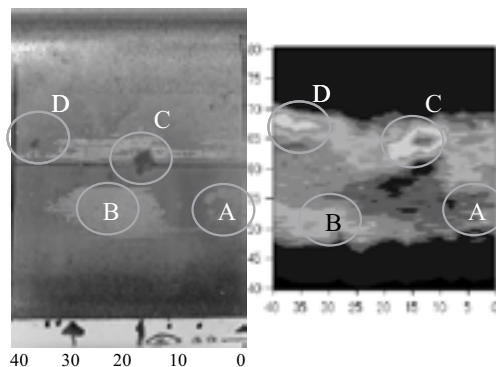


Fig.3 Result of measurement
(excitation coil: diameter 8mm)

化は白色層部の組織変化(パーライト→マルテンサイト)による物性変化を検出していると考えられる。

比較のために、白色層のないレールについても測定を行っているが、白色層のないレールにおいては有意な信号は認められなかった。

また、励磁コイル直径を小さくして空間分解能について検討を行った。本試験体系の空間分解能は、励磁コイル径と、リフトオフのいずれか大きいほうに支配される。先の試験で用いた励磁コイルの径は 20mm であり、リフトオフは 8mm 程度であるため、励磁コイルの径が空間分解能を支配していることになる。そこで、励磁コイルの直径を 8mm に変更し、空間分解能の改善効果を確認した。測定結果を Fig.3 に示す。白色層 A, B に加えて小さなキズ C, D なども検出され、空間分解能が向上したことがわかる。

3. まとめ

レールに生じる白色層の磁気的・電気的物性の変化を、SQUID を用いて検出する手法を検討した。

実レールの測定では、SQUID 回路の感度調整を行い、レール頭頂面の広い範囲の応答信号を得ることができた。得られた測定信号からは、白色層分布と信号変化に良好な対応が確認できた。白色層のないレールや未使用レールではこのような信号変化は生じないことから、白色層部の組織変化による電磁気的物性変化をとらえていると考えられる。

また、励磁コイルをより小型にして検出試験を行った結果、空間分解能が改善した結果を得ることができた。本試験結果により、SQUIDを用いてレール頭頂面の状態を詳細に測定できる可能性を確認できた。

今後は、フィールド測定が可能な検査システムの開発を行う予定である。

参考文献

1. T. Nakamura, et al.: Property analysis of rail white layer and determination methods, Tribology Conference, Vol. 9 (2007) p. 37
2. Y. Miyazaki, et al.: Non destructive test of White Etching Layer on rail surface layer by HTC SQUID, Abstracts of JST, Vol. 76 (2007) p. 63

Development of High-Temperature Superconductors for Practical Applications

E. Hellstrom¹, D. Abraimov¹, A. Gurevich¹, F. Hunte¹, J. Jaroszynski¹, J. Jiang¹, F. Kametani¹,
S. Kim¹, D. Larbalestier¹, A. Polyanskii¹, D. Rodrigues², B. Senkowicz¹, C. Tarantini¹,
O. Uwakweh³, A. Yamamoto¹

¹Applied Superconductivity Center, Florida State University and National High Magnetic Field Laboratory, Tallahassee, FL 32311 USA

²School of Engineering Lorena, University of São Paulo, Lorena, SP, Brazil

³Dept. of Eng. Sci. and Mat., University of Puerto Rico-Mayagüez, Mayagüez, PR 00681 USA

Research on YBCO and MgB₂ for conductor applications focuses on understanding what limits J_c, particularly in field, and how to increase it. One thrust of our work is on MgB₂ bulk material, where a key issue is increasing H_{c2}. Thin film MgB₂ can exhibit H_{c2}^{||ab} > 70T (0K) but the highest H_{c2} in bulk samples is ~35T. We are working to understand why films can have such high H_{c2} and how we can use this understanding to increase H_{c2} in bulk MgB₂. The high-H_{c2} MgB₂ films contain C so we have investigated adding C to bulk MgB₂. We have milled ex situ MgB₂ and C together using high-energy ball milling (SPEX 8000M), and then sintered the powder into pellets using hot isostatic pressing (HIP).

The maximum amount of C we can incorporate into MgB₂ using this method with HIPping at 1000°C is x = 0.04-0.05 (in Mg(B_{1-x}C_x)₂). We have used this C content in a recent study (1) investigating the effect of different milling times on grain size, J_c, and H* after HIPping. Milling incorporates C into MgB₂ within 60 min as observed from lattice parameter measurements. Milling from 1 to 600 min decreased the MgB₂ grain size in the HIPed samples from ~80nm to ~20nm, and for longer

milling to 3000 min the size remained at ~20nm. Fig. 1 shows J_c(H) for milled samples. There is little relation between J_c(0T) with milling, but for fields > 8T, J_c increased with milling time up to 1200 min. H* extracted from the J_c-H or Kramer plots is shown as a function of milling time in Fig. 2. It shows H* increased with milling time up to 600 min then was about constant for milling times up to 3000 min (see 4.2K data). In contrast, H_{c2} was extracted from resistivity measurements extrapolated to ~35T (0K) for all milling times except 3000 min. Fig. 3 shows that H* is proportional to 1/d, the MgB₂ grain size.

We conclude from this study that C doping increased H_{c2}^{||ab} to ~35T (0K) independent of milling time. In contrast, H_{c2}^{⊥ab}, which is measured by H*, increased with milling time as the grain size decreased, due to increased grain boundary scattering. The very small MgB₂ grain size after extensive milling and HIPping is due to grain boundary pinning preventing grain growth, presumably due to MgO from the surface of the ex situ MgB₂ powder being milled into the mixture.

(1) B. Senkowicz et al., *Supercond. Sci. Tech.* 21 (2008) 650-657

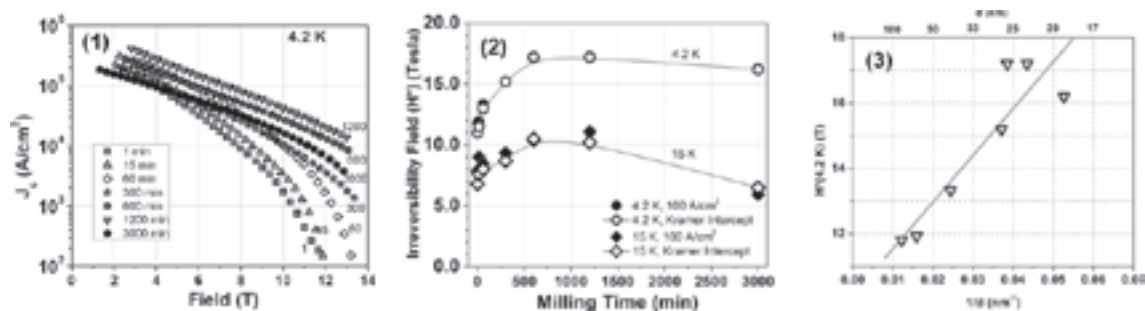


Fig. 1 J_c(H) at 4.2 K.

Fig. 2 Irreversibility field (H*) as a function of milling time at 4.2 K (circles) and 15 K (diamonds) using J_c = 100A/cm² criterion (solid symbols) or Kramer line intercept (open symbols). Lines are to guide the eye.

Fig. 3 H* (4.2 K) from Fig. 2 as a function of inverse grain size.

高温超電導複合体の実用化への要因とその材料科学的検討

Approach to Industrialization of HT Composite Superconductors based on Material Sciences

長村 光造(応科研), 和田 仁(東大), 落合 庄治郎(京大), 松下 照男(九工大), 秋田 調(電中研),
 Larbalestier D.(NHMFL), Nyilas A.(CEME), Prusseit W.(THEVA), Otto A.(AMSC), Hampshire D.(Durham Univ.),
 OSAMURA Kozo(RIAS), WADA Hitoshi(Univ. Tokyo), OCHIAI Shojiro(Kyoto Univ.), MATSUSHITA Teruo(Kyushu Inst. Technol.), AKITA
 Shirabe(CRIEPI), LARBALESTIER David(NHMFL), NYILAS Arman(CEME), PRUSSEIT Werner(THEVA), OTTO Alex(AMSC), HAMPSHIRE
 Damian(Durham Univ)
 E-mail: kozo_osamura@rias.or.jp

1. はじめに

超電導材料を実用化に向けて研究開発するために解決しなければならない材料科学的な要因について共同研究チームで検討した結果についてその概要を報告する。工学的臨界電流密度の向上、交流損失の低減、機械・電磁特性の改良が不可欠の要因であり、それらの特性を改良する指針と精密な評価技術の開発の必要性について報告する。

2. 共同研究の概要

超電導線材の実用化のためには高臨界電流、低交流損失、高強度等の総合機能を最大化した高性能・低コスト超電導材料の設計と最適な材料の開発を行なうということが重要なことであるが、それら機能の改良要因とその具体的な制御因子を表1にまとめて示した。これら機能をバランスよく実現するためには超電導材料を複合材料として把握することが必要である。上記の観点より平成16年10月から平成19年9月まで実施してきたNEDO Grant (応用超電導) の国際共同研究の結果について報告する。プロジェクトの目的は 1) 三大機能を最大化した高性能・低コスト超電導材料の設計と最適な材料の開発に関して提言と指針を示す、2) 材料開発と表裏一体となる特性評価技術の高度化を図ることである。これらの目的を実現するために国内外の大学・研究機関・製造メーカーの10機関が参加し、その他研究協力を住友電工と日立製作所に依頼した。

表1 3大機能を最適化する材料科学的因子

機能	要因	具体的な制御因子
高工学的 臨界電流 密度化	粒界弱結合の解消	超電導層の高配向化
	ピンニングサイトの導入	ナノスケール非超電導構造の導入
	真性歪の最適化	複合構造の設計と材料選択
高強度・ 高剛性化	圧縮残留歪の最大化	弾性定数、熱膨張係数の適正化
	強度補強要素の導入	基板、マトリックス材料の選択、ラミネーション
低交流 損失化	結合損失、履歴損失の低下	バリアーの導入、細線化、ツイスト、マトリックスの高抵抗化

実用材料として将来BSCCO線材, YBCO coated conductor, MgB₂線材系の3大材料を温度、磁場の領域ごとに棲み分けして使用することが合理的と考えられるが、どの材料にも共通して3大機能の同時実現が実用化の鍵となっている。YBCO系材料についてはAMSCおよびTHEVAから、BSCCOについては住友電工およびAMSC、MgB₂については日立から供給をうけ共同研究を実施した。討論の場として国際ワークショップ Mechanical and Electromagnetic Properties of Composite Superconductorsを2005年7月に京都で、2006年7月には英国Durhamで、2007年8月に米国Princetonで開催した。その成果は Supercond. Sci. and Technol. 誌 vol. 28, no. 12(2005)およびvol. 21, no. 5 (2008)の特別号に公表された。

3. 研究成果

実用材料の工学的臨界電流密度(J_c)はdepairingあるいはdepinningのいずれかに依存する。前者は超電導状態の消失であり、粒界弱結合が代表的なものである。後者は真性ピンを含め、超電導相中の不均質構造による磁束のピン止めに依存する。各線材特有な微視的構造の評価と制御について考察を行い、実用材のような不均質組織では電圧発生はパーコレーション現象を通して起こることの重要性を指摘した。歪・電磁気特性については可逆応力歪限を定量的に決定すること、劣化は超電導層の破壊によることを直接に証明するなどの成果を得た。

脆性層を含む複合体の強度および剛性の最適化には圧縮残留歪の最大化と強度補強要素の導入が不可欠であり、各構成材料の組み合わせにより最適化の解を見出した。現在BSCCO線材およびYBCO被覆導体で実用的な意味で交流損失の開発研究がなされ始めている。超電導フィラメントの細線化、フィラメント配置の最適化、ツイストの導入、酸化物バリアーの導入、マトリックスの高抵抗化等の方策がとられ徐々に低交流損失化が図られているが、最近加工段階でバリアー材に金属を使用することによりサブミクロンオーダーの非常に薄い酸化物バリアーを均一に導入する基礎実験に成功した。

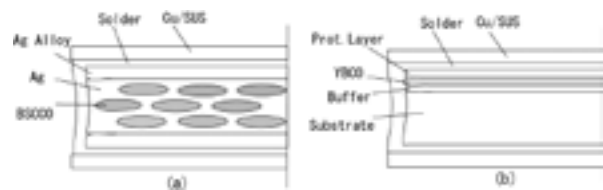


図1 実用高温超電導線材の構造 (a) BSCCO系、(b) YBCO系

実用線材の開発の過程で、必要性に迫られて、超電導素線そのものが階層性の最も初原として複合体という構造を持つようになってきた。図1に示すようにBSCCO系およびYBCO系線材いづれにおいても、ラミネーションを施した素線構造をとるようになってきており、今後は図1に示すような線材構造を前提に諸特性がバランスよく発現できるような設計が必要と考えられる。本研究においても、このような複合体の熱膨張係数、ヤング率、超電導層中の内部歪、歪・電磁特性等を予測可能な半経験的理論式を提案してきた。これをさらに発展させることで、実用目的により工学的臨界電流密度、機械強度、歪・電磁特性をどのような範囲で組合わせて利用できるかといった設計が可能になるものと考えられる。

さらに本研究グループにより微視的組織の評価方法、不可逆境界の定量的決定、軽量伸び計の開発、放射光・中性子回折による内部歪測定、Walter springによる歪測定、臨界電流密度の曲げ試験等の評価方法を開発するとともに、それらの研究成果の一部が国際標準方案の作成に寄与することになった。

これらの共同研究はNEDO国際共同研究助成事業(2004EA004)のもとに実施されたものである。

引っぱり歪による DyBCO コート線材の塑性変形についての電磁気学的考察

Electromagnetic investigation on plastic deformation of

DyBCO coated conductor by tensile strain

松下照男、磯部 現、木内 勝 (九工大); 長村光造 (応用科学研); Werner Prusseit (THEVA)

MATSUSHITA Teruo, ISOBE Gen, KIUCHI Masaru (Kyushu Inst. Tech.);

OSAMURA Kozo (RIAS); Werner Prusseit (THEVA)

E-mail: matusita@cse.kyutech.ac.jp

1. はじめに

REBCO コート線材は高磁界下の臨界電流特性が優れていることから高磁界下での使用が期待されている。そうした使用環境下ではコート線材に強大な電磁力が働くため、コート線材の実用化にあたっては機械的応力が臨界電流特性に及ぼす影響を明らかにしておく必要がある。本研究ではその一例として DyBCO コート線材に引っぱり変形を与え、それによる臨界電流密度の変化を調べた。

2. 実験

実験に用いた試料は厚さが 90 μm の Hasetloy 基板上に 3.7 μm の MgO 層を ISD 法で蒸着し、さらに MgO バッファ層を載せ、その上に 1.6 μm の超電導層を蒸着し、最後に 0.7 μm の Ag を載せたコート線材で、臨界温度は 89.6 K である。この線材に室温で 0.7% の引っぱり歪を加えた。表面組織を観察して Ag に Lueders バンドが形成していて明確に内部組織が破損している領域 (試料 A22) とそうではない領域 (試料 A21) を切り出し、これと引っぱり歪を加えていない試料 A23 について、テープ面に垂直磁界下で SQUID により磁化を測定した。この磁化の緩和から低電界領域における E-J 特性を評価し、臨界電流密度や n 値を見積もった。加えた磁界は 7 T まで、測定した温度範囲は 20–80 K である。

3. 結果及び検討

Fig. 1 に 20 K における 3 つの試料の臨界電流密度を示す。この結果から明確な損傷は認められない領域の試料 A21 の特性は参照試料の A23 と同等で、超電導特性は影響を受けていないことから、現実に損傷はなかったものと考えられる。一方、試料 A22 の臨界電流密度は大幅に劣化しており、その低下率から見積もると、電流を遮るように生じたクラックの平均間隔は 60 μm 程度になる。さらに詳細に調べると、試料 A22 の臨界電流密度の磁界依存性も劣化していて、高温になるほど顕著となる。Fig. 2 は 50 K における規格化臨界電流密度の磁界依存性で、高磁界になると劣化がより顕著になる。このように磁化電流密度の磁界依存性が劣化しているのは、大きなクラックの間の、一見して健全であるかのような領域にマイクロクラックが生じ、そのマイクロクラックをはさんだ弱結合によるものと考えられる。実際に、20 K、1 T における磁化の緩和から得られた E-J 特性の n 値を比較してみると、A21 の値が 50 を超えるのに対して A22 の値は 25 程度であり、上の予想を裏付けている。

磁束クリープ・フローモデルによる解析結果もこうした予想を支持しているが、その詳細については当日報告する。

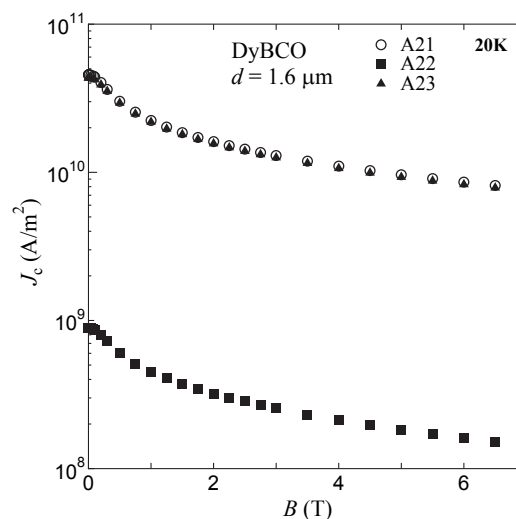


Fig. 1: Critical current density of three samples of DyBCO coated conductor in a normal magnetic field at 20 K.

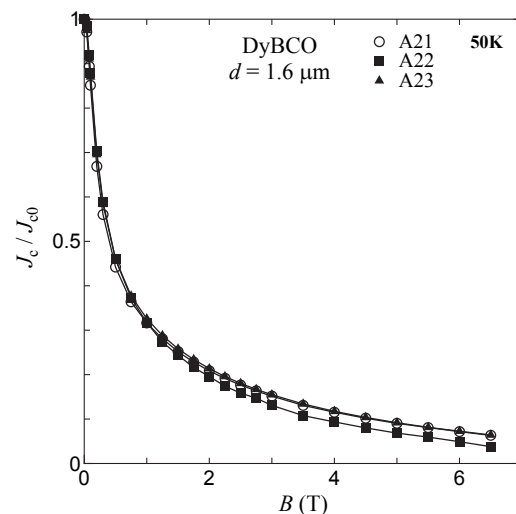


Fig. 2: Magnetic field dependence of normalized critical current density at 50 K.

謝辞 本研究は NEDO の国際共同研究助成事業の援助を受けて実施したものである。

Critical current measurements in the ~ 100 picovolt range on superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ tapes

Damian P. Hampshire and J. S. Higgins

Superconductivity Group, Physics Department, Durham University, Durham, DH1 3LE, UK

E-mail: d.p.hampshire@durham.ac.uk

Introduction

The development of high temperature superconducting (HTS) tapes is driven, in part, by the desire to efficiently transport energy over large distances, as well as by applications such as high-field magnets. From the perspective of energy transport, HTS tapes are designed to carry critical current densities (J_C) that are as large as possible while generating as little heat as possible. For magnets, the affect of mechanical strain on the upper critical magnetic field and J_C is of increased importance.

Hence in Durham, we are interested in how J_C is affected by magnetic field, temperature and strain. In order to accurately measure and understand the current carrying capacity of tapes, we would like to make measurements over as large a range of voltages as possible. In this work, we present electrical measurements with a voltage noise that approaches the fundamental Johnson noise limit:

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{4k_B TR\Delta f},$$

where k_B is Boltzmann's constant, T is the temperature, R is the resistance under test, and Δf is the range of frequencies to which the measurement is sensitive.

Experimental

Critical current measurements were performed on a superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) tape using a standard V - I technique. Of primary interest were the voltage fluctuations across the voltage taps during static current and dynamic current V - I traces. The voltage fluctuations were measured using both a nanovolt and a picovolt amplifier. Measurements were performed at: 77 K and 4.2 K; zero and non-zero applied tape currents; zero applied magnetic field at 77 K, and in fields up to 15 Tesla at 4.2 K.

Results and discussion

Figure 1 shows a dynamic V - I trace, at 4.2 K and 5 T, taken over 2 minutes using the picovolt amplifier. At low applied currents, $I < 40$ A, the peak-peak voltage fluctuations are ~ 4 nV, corresponding to an rms voltage of ~ 800 pV. At higher currents, the fluctuations increase in magnitude.

Voltage fluctuations were also measured over the course of several minutes while keeping the current through the YBCO tape. Figure 2 shows typical fluctuation data and their corresponding histograms. Since Johnson noise is random in nature, the histograms should look Gaussian. Figure 2(a) is with zero applied tape current ($I_{\text{tape}} = 0$). Under these conditions, the theoretical prediction yields $V_{\text{rms}} = 43$ pV. Our result of ~ 120 pV is within a factor of three to this prediction. Similar results are found for applied currents where the tape retains the superconducting state ($V_{\text{rms}} \sim 100$ - 350 pV). At higher currents with the tape in the resistive state, Fig. 2(c), the voltage fluctuations increase significantly above the Johnson noise levels.

Figure 3 gives a summary of V_{rms} for various I_{tape} over the entire V - I trace. The shape of this plot mimics the V - I trace. While the voltage fluctuations approach the Johnson limit for low I_{tape} and low fields, they deviate at higher currents and fields. The significance and implications of these results will be discussed.

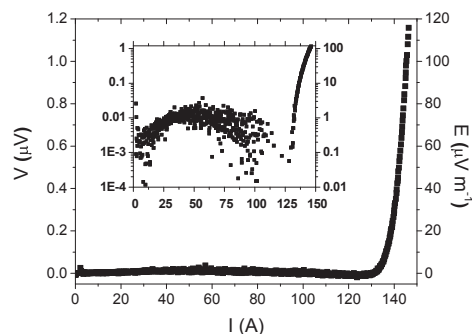


Fig. 1: Voltage and electric field versus applied current, using a picovolt amplifier. Inset is a log plot of the same data in μV versus Amps.

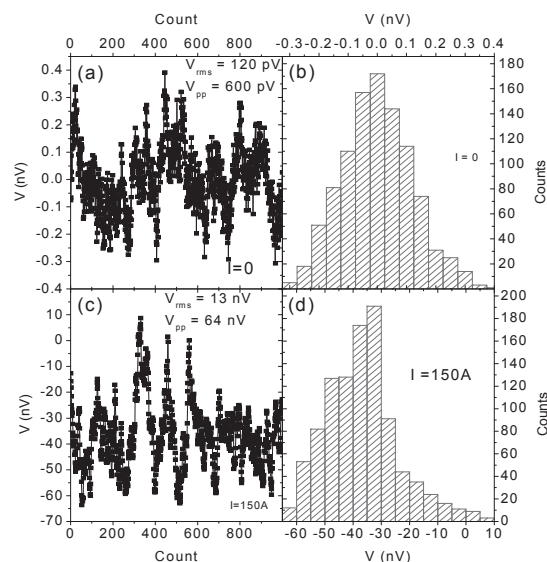


Fig. 2: Voltage fluctuations for the YBCO tape measured at 4.2 K and 5 T, using a picovolt amplifier. (a) $I_{\text{tape}} = 0$ A. (b) Histogram of (a). (c) $I_{\text{tape}} = 150$ A. (d) Histogram of (c).

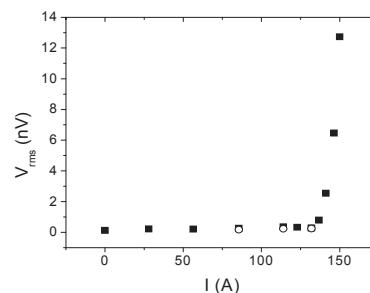


Fig. 3: RMS voltage fluctuations versus applied current, at 4.2 K and 5 T, using a picovolt amplifier. (■) symbols are data taken with increasing applied current. (○) symbols are data taken with decreasing applied current.

Mechanical Measurements on Superconducting Wires and Tapes in Retrospective - Achieved Results with Sensing Instrumentation and their Impact on Standardization Process

Arman Nyilas

Cryogenic Engineering & Materials Expertise, CEME, Germany

E-mail: arman.nyilas@freenet.de

Introduction

Design of superconducting magnets necessitates the correct knowledge of mechanical engineering data of used superconducting wires, which in majority of cases consist of NbTi alloys, Nb₃Sn composites, and several types of current high T_c tapes. Within the last years much effort were spent on the determination of strain during uniaxial tensile loading of tiny and fragile superconducting wires. Within this technological development era several low mass, cryogenic proof extensometers were developed, which showed their sound performance worldwide. All extensometers are based on dual averaging type, capable to measure nearly all kind of superconducting wires. Their resolutions are in daily use well below 100 nm and have a perfect linearity within the measurement range using a high quality signal conditioner [1]. Further developments made also possible to measure the Poisson's coefficient with a combined axial/diametral extensometer system set-up [2]. In particular, the Poisson's ratio is an important value, which can give useful information on deviatoric strain necessary for composite materials analysis. In addition, a quantification of the measured data have been worked out with the aim to give a tool to the operator to assess the obtained data according to statistical analysis based on recently recommended statistical procedure (GUM, Guidance of Uncertainty in Measurement).

Results

Figure 1 shows a dual extensometer system with 25 mm gauge length with a mass of less than 3 g capable to resolve strains up to 10 % at high resolution. In Figure 2 a much smaller extensometer with a gauge length 12 mm is represented. These types are used since nearly a decade in several laboratories. The total mass of this system is less than a gram. In Figure 3 a load versus displacement curve is shown which is the test result of a Nb₃Sn wire. The resolution of this graph shows a scatter of the raw data within approximately $\pm 0.05 \mu\text{m}$. Thus it is possible to achieve sound results with an averaging dual extensometer system. Prior to start of a measurement campaign the extensometer system should be, however, calibrated using a high quality calibration system. For this purpose a servo motor controlled linear actuator system has been developed as a table system to calibrate the extensometers. The error in repeatability of the positioning for this linear actuator was determined to be less than 20 nm. In addition, prior to the start of any test program the entire testing machine was checked using similar size specimens compared to the actual specimen size. These specimens consisted of standard metallic materials (aluminum or copper alloy) and were measured by uniaxial tensile testing to determine the key engineering data such as the Young's modulus. In Figure 4 finally, the obtained raw data of a biaxial cryogenic test of a Nb₃Sn wire is shown. This Figure shows the stress versus strain data of axial and diametral orientation of the composite wire under loading. The Poisson's ratio of this particular superconducting wire resulted to values of 0.28 and 0.39 at 295 K and at 7 K, respectively.

Using all this knowledge a draft for Nb₃Sn composite wire was prepared for the tensile measurement at room temperature to be submitted to IEC/TC90 committee. This draft includes also the first results of international round robin test carried out worldwide. In addition, a comprehensive example of measurement uncertainty

computation has been represented in this standard. Using this step by step procedure given as an Annex the user is capable to judge the measured data according to the recommended GUM procedure.

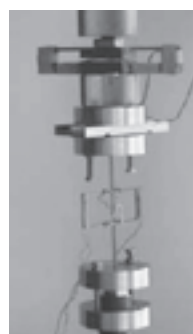


Fig. 1 Averaging dual extensometer system. Total mass ~ 2.8 g



Fig. 2 Averaging dual extensometer system. Total mass ~ 0.6 g

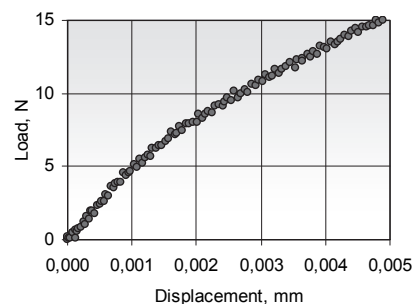


Fig. 3 Original raw data of load versus displacement results of a Nb₃Sn wire measured with a dual averaging extensometer system.

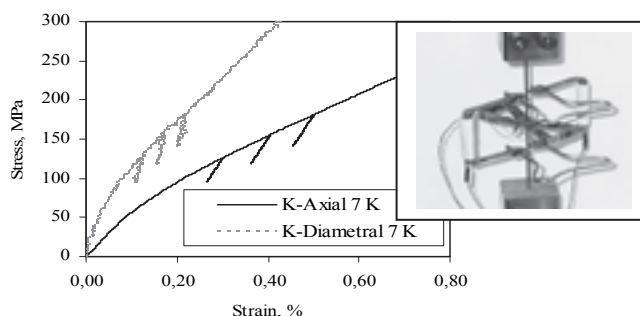


Fig. 4 Cryogenic stress versus strain results of biaxial test of a Nb₃Sn wire. The insert shows the image of biaxial extensometer set-up.

References

- [1] Nyilas, A., "Transducers for Sub-Micron Displacement Measurements at Cryogenic Temperatures", in *Advances in Cryogenic Engineering (Materials) 52A*, edited by U. B. Balachandran et al., Plenum, New York, 2006, pp. 27-34.
- [2] Nyilas, A. and Weiss K.P., "Bi-Axial Strain Response of Structural Materials and superconducting Nb₃Sn wires at 295 K, 7 K, and 4 K", will be published in *Advances in Cryogenic Engineering (Materials) 2008*

BSCCO-2223 テープの残留ひずみ集積および 臨界電流の耐引張ひずみ特性に及ぼすラミネーション効果

Lamination effects on residual strain accumulation and tensile strain tolerance of critical current in BSCCO-2223 tapes

落合庄治郎, 六角広介, J. K. Shin, 岩本壮平, 奥田浩司, 北條正樹, 菅野未知央 (京都大学);
長村光造 (応研); JASRI 佐藤真直 (JASRI); A. Otto, A. Malozemoff (AMSC)

OCHIAI Shojiro, ROKKAKU Hirosuke, SHIN JaeKyoung, IWAMOTO Sohei, OKUDA Hiroshi, HOJO Masaki,
SUGANOMichinaka (Kyoto University); OSAMURA Kozo (RIAS); Alex OTTO, Alex MALOZEMOFF (AMSC)

E-mail: shojiro.ochiai@materilas.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

1 緒言

Bi2223/Ag/Ag alloy 複合テープを高弾性率のステンレス鋼やモリブデンとラミネート複合化すると高強度化や臨界電流の高耐ひずみ特性向上が実現できること、これには Bi2223 フィラメントの試料長さ方向の熱残留ひずみが大きな影響を与えることが知られている⁽¹⁾。本研究では、ステンレス鋼をラミネートした Bi2223 複合テープを用いて、熱的・機械的に生じる試料長さ方向の残留ひずみの集積プロセスを X 線回折法とモデル解析で調べること、残留ひずみ集積に及ぼすステンレス鋼ラミネーション効果を明らかにすること、上記結果を用いて、臨界電流の引張負荷ひずみ下での耐ひずみ特性および引張・圧縮における臨界電流の耐ひずみ範囲 (strain window) に及ぼすラミネーション効果について考察することを目的とした。

2 実験方法

2.1 供試材: American Superconductor Corporation (AMSC) 社で作製された、高臨界電流型 Bi2223/Ag/Ag alloy 複合テープをインサート材としステンレス鋼と複合化した高強度型テープを用いた。このテープは、Fig.1 に示すように、453K で複合化されている⁽¹⁾。また臨界電流確認のため AMSC で一旦 77K に冷却され、室温に戻された後、京大に送られている。

2.2 室温での残留ひずみ測定: 著者らはインサート材として用いられた高臨界電流型試料の熱残留ひずみの測定と解析を行ってきた⁽²⁾。その際の測定方法と同様に、SPRING8・ビームライン 46XU での X 線回折により、エネルギー 22KeV、ビームサイズ 0.5x1.0mm²、(200)・(220)面を用いて測定した。

2.3 熱履歴および機械的履歴でのひずみ変化計算: 熱履歴に伴うひずみ変化は前報⁽²⁾の計算方法を本試料に適合するよう拡張して適用した。複合化前のインサート材およびステンレス鋼への荷重負荷と複合化後のラミネート後の応力緩和による機械的履歴は Otto ら⁽¹⁾の計算方法に銀の弾塑性変形を組み込んだ新たな計算方法を用いた。この計算方法と X 線回折で求めた Bi2223 フィラメントの室温残留ひずみを組み合わせることで、全熱的・機械的履歴中での Bi2223 フィラメント、銀、銀合金、ステンレス鋼のひずみ変化過程を求めた。

3 結果および考察

X 線回折で測定した Bi2223 フィラメントの室温での残留ひずみは -0.133% であった。この値を使って Bi2223 フィラメント、銀、銀合金、ステンレス鋼のひずみ変化を計算した。代表例として Bi2223 フィラメントのひずみ変化を Fig.2 に示す。併せて複合化しないインサート材中の Bi2223 フィラメントのひずみ変化を比較のため示した。インサート材は ABCDEFGHEFG、ラミネート複合材は ABCDIJKLMNOPQROPQ と変化する。こ

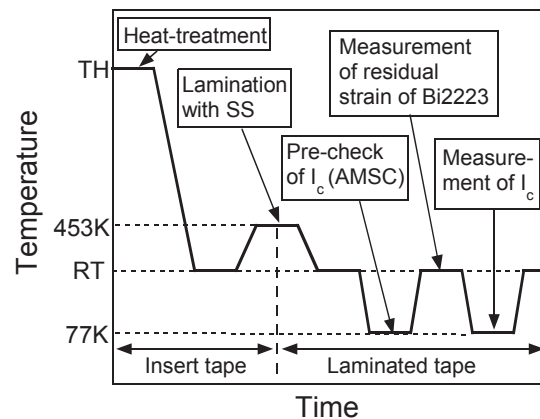


Fig.1 Thermal and mechanical history of the present sample.

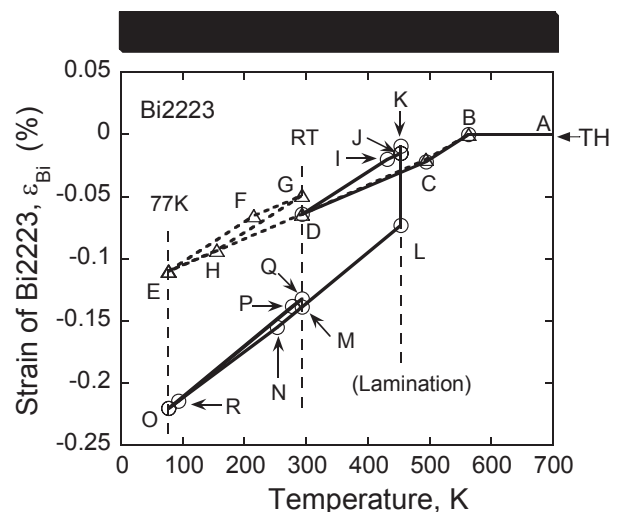


Fig.2 Residual strain accumulation process of Bi2223 filaments in the laminated and insert tapes.

のように、両者では複合化後のひずみ量の差は大きく異なり、特に低温で大きくなる。この結果はラミネート複合材中の Bi2223 フィラメントはインサート材中のそれに比して特に低温側で高い圧縮ひずみを持ち、臨界電流の耐引張ひずみ特性を向上させることを意味し、実験でも確認された。さらに本結果と Otto らが報告している圧縮・引張を網羅する strain window の向上⁽¹⁾と突き合わせて考察した結果、複合化は Bi2223 フィラメントの破壊を遅らせる効果もあることが示唆された。

参考文献

1. A. Otto et al.: Supercond. Sci. Technol., 18(2005)S308-312.
2. S. Ochiai et al.: Supercond. Sci. Technol., 20(2007)202-210.

超伝導特性に及ぼす応力・歪効果－ 曲げ試験による評価－
Stress-strain effects in superconductors – bending strain effects –

和田 仁, 宮副 照久, 安藤 努, 宮松 和浩 (東大院新領域); 黒田 恒生, 伊藤 喜久男 (NIMS); 菅野 未知央 (京都大)
WADA Hitoshi, MIYAZOE Akihisa, ANDO Tsutomu, MIYAMATSU Kazuhiro (Univ. of Tokyo);
KURODA Tsuneo, ITO Kikuo (NIMS); SUGANO Michinaka (Kyoto Univ.)
E-mail: hitoshi.wada@k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

超伝導の応用機器では、超伝導線材に大電流が流れる。その時、線材にはロレンツ力、熱収縮・膨張等ともなうさまざまな応力・歪が作用し、超伝導線材の特性を低下させる。超伝導線材を用いた機器が広く使われるためには応力・歪効果を評価する技術の確立が必要である。本研究では応力・歪効果を簡便に評価する方法として曲げ試験を採り上げ、その国際標準化を含めて検討した。

2. 実験・結果

2.1 簡便な曲げ応力・歪効果試験法

Bi2223 テープ線材の臨界電流を曲げ歪の関数として測定する簡便な試験方法を確立するため、11 機関の参加を得て国際ラウンドロビンテストなどを実施し、曲げ歪負荷の与え方、試料の固定方法、電流端子固定法、冷却速度などの影響を検討した。その結果、試料をマンドレルでサンドイッチする方法が国際的に合意され、IEC に標準試験法として提案されることになった。

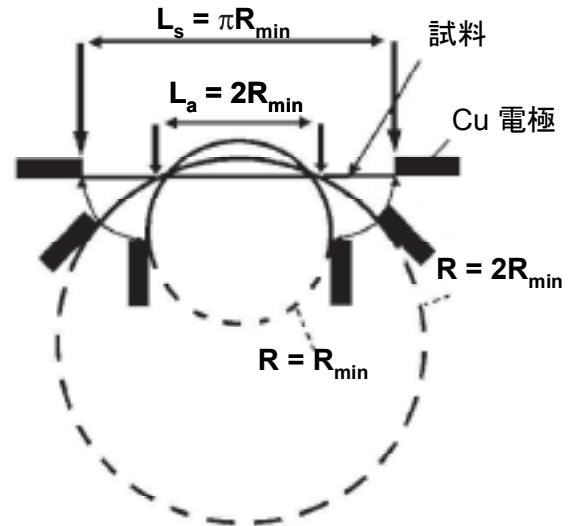
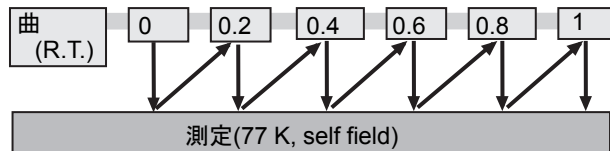


Fig. 2 Principle of Goldacker Bending Test

単一試料測定 (Series Sequence)



複数試料測定 (Parallel Sequence)

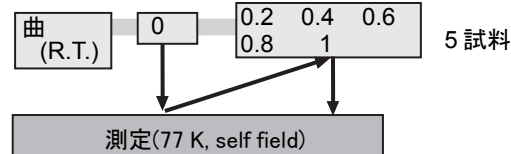


Fig.1. Bending Round Robin Test Procedure

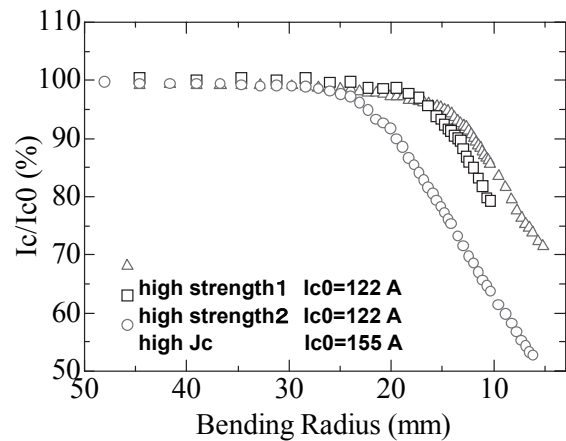


Fig.3 Bending strain effect in Bi2223 tape conductor

2.12点支持式連続曲げ試験法 (Goldacker 法)

国際標準化に関連して開発された新しい曲げ試験法 (2点支持式連続曲げ試験法) によって、BI 系および Y 系線材の評価を試みた。Fig. 2 にこの新しい曲げ試験法 (Goldacker 法) の原理を示す。また、Fig. 3 に曲げ歪による Bi2223 線材 (高強度および高臨界電流試料) の臨界電流の変化を示す。曲げ歪下では機械的強度を高めた線材の Ic は、大きな臨界電流を持つように設計された線材よりも大きな歪まで劣化しない。Y 系 coated-conductor についての結果からは、引張り歪の場合のようなピークが観察されなかった。

3. 謝辞

本研究の実施に当たりご協力いただいた多くの VAMAS、IEC-TC90 の研究者に感謝する。

RE123 線材における超伝導特性に及ぼす応力・ひずみ効果 —引張・圧縮試験による評価

Effect of stress and strain on superconducting properties in RE123 coated conductors evaluated by tensile and compressive test

菅野未知央(京大), 崔 世鎔, 伊藤喜久男, 木吉 司 (NIMS), 宮副照久, 宮松和浩, 安藤 努, 和田 仁(東大)

長村光造(応科研), Werner Prusseit (YHEVA)

SUGANO Michinaka(Kyoto Univ.);

CHOI Seyoung, ITOH Kikuo, KIYOSHI Tsukasa (NIMS)

MIYAZOE Akihisa, MIYAMATSU Kazuhiro, ANDO Tsutomu, WADA Hitoshi (Univ. of Tokyo)

OSAMURA Kozo (RIAS) and PRUSSEIT Werner (THEVA)

E-mail : sugano@kuce.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、NEDO の国際共同研究助成事業 (NEDO グラント) 「3 大機能を最適化した実用複合超電導体の開発と機械・電磁気特性評価技術の高度化」の一環として、主に RE123 系 coated conductor の電磁機械特性に関する研究を行ってきた。RE123 系 coated conductor は、その優れた臨界電流密度—磁場特性および金属基板に起因する高強度を活かして、強磁場マグネットへの応用が期待されている。一方で、coated conductor は金属テープ基板の上に成膜された多層膜という従来の線材とは全く異なる構造を有しており、基板の変形挙動が直接膜の破壊に影響を及ぼすことや非対称な線材構造を反映して、巻線の向きによって超伝導体が異なるひずみ状態が異なるという特徴がある。

本発表では、Hastelloy C-276 基板の降伏挙動と線材のひずみ特性との関係と一軸引張・圧縮ひずみによる臨界電流の可逆変化に着目して、本プロジェクトで得られた研究成果の一部を紹介する。

2. 実験方法

基板の降伏挙動についての実験では、THEVA 社から提供を受けた Ag/RE123(RE=Y, Dy, Sm)/MgO/Hastelloy C-276 という構造の線材を用いた。ここで、バッファ層である MgO は ISD 法で成膜されている。77 K で引張試験および I_c -引張ひずみ特性の測定を実施した。また、異なる加工熱処理履歴の Hastelloy 基板について、応力—ひずみ特性を 77 K で測定し、基板の前処理が Hastelloy の変形挙動に及ぼす影響について調べた。

引張・圧縮ひずみ状態での I_c 測定には、Walters spring (WASP)型のひずみ負荷プローブを用いた。Be-Cu 製のスプリング治具表面に YBCO coated conductor をハンダ付けし、スプリングにねじり変形を与えることで、線材にひずみを負荷した。異なる外径のスプリングを用意し、また巻線時の線材の向きを逆転させることによって異なる初期ひずみ状態を実現して、この初期曲げひずみが可逆ひずみ特性に与える影響について調べた。ここでは、SuperPower 社の Cu/Ag/YBCO/MgO/Hastelloy C-276 という構造の線材を用いた。

3. 実験結果

Fig. 1 に Walters spring プローブを用いて測定した 77 K、自己磁場中での I_c -ひずみ特性を示す。ここで、凡例の数値はスプリングの直径を、“Tensile”、“Compressive”はスプリングへの巻線により超伝導体に引張、圧縮の曲げひずみが負荷される曲げ方向であることを表している。一軸引張によるデータと比較すると、引張(圧縮)初期曲げひずみ負荷により曲線のピー

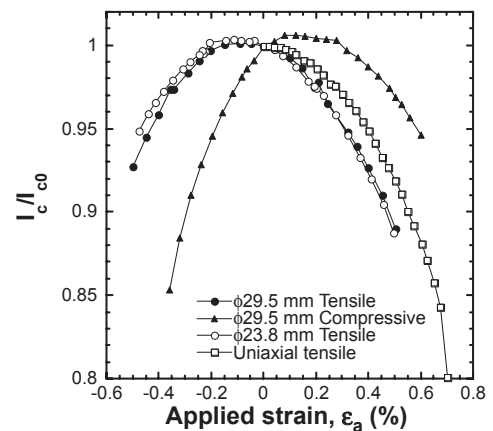


Fig. 1 Normalized I_c as a function of applied strain measured using WASP with the different diameters. The data obtained

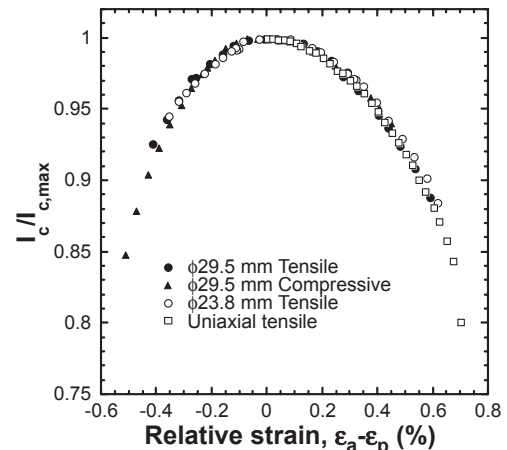


Fig. 2 Normalized I_c by $I_{c,max}$ as a function of relative strain from the peak one.

クが圧縮(引張側)側にシフトしていることがわかる。ここで、横軸についてピークひずみの位置をひずみゼロに平行移動させ、縦軸を I_c のピーク値で規格化した結果を Fig. 2 に示す。一軸引張のデータを含めて全ての曲線が同一の規格化曲線に一致することが確認された。このから、曲げと引張/圧縮が同時に負荷される場合の超伝導体のひずみ状態は両者の単純な足し合わせで表現できることが明らかになった。

発送配電技術の動向と超電導技術の役割 -超電導材料の研究開発動向を鍵として-

General discussion on the trend and future of electric power generation, transmission and distribution, and role of SC technologies
- Direction of R&D of SC materials -

秋田 調((財)電力中央研究所)

SHIRABE Akita (CRIEPI)

E-mail: akita@criepi.denken.or.jp

1. はじめに

地球温暖化問題への関心が世界的に高まってきている中で、電気事業における発送配電技術の研究開発も大きく方向性を変えつつある。また、石油価格の高騰は固定化されつつあり、エネルギー源の確保を中心としたエネルギーセキュリティ問題も重要性を増しつつある。具体的には、風力発電、太陽光発電などの自然エネルギーを最大限に活用する技術開発、地球環境問題への対応とエネルギーセキュリティの確保の双方に極めて有効な原子力技術開発、省エネルギー技術開発などが重視されてきている。

ここでは、これらの技術開発の方向性に対して、超電導技術が果たすことが出来る役割と、そのために必要とされる超電導材料の研究開発の方向性に関して述べる。

2. 地球環境問題

平成 19 年度にわが国で発電された電力量の半分以上は火力発電による電力であり、わが国の極めて利便性が高い暮らしは二酸化炭素の排出との引き換えで得られているといっても過言では無い。このような、利便性が高い暮らしを確保しつつ、二酸化炭素の排出を削減するためには、原子力発電、自然エネルギー利用など、二酸化炭素を排出しない発電方法に移行していくことと、自動車など現状では二酸化炭素排出が避けられない技術を電化し、排出量を削減することが有効である。わが国は、世界に向かって、2050 年には世界の二酸化炭素排出量を 50%にまで削減することを提案している。

具体的には、セクトラルアプローチと呼ばれる、技術ごとに二酸化炭素排出が少ない先進技術または代替技術を開発し、これを世界に広めることにより、世界的な二酸化炭素排出を削減しようとの考え方である。このような技術として、政府が取り上げた主要な 20 の技術開発の中に、「先端的原子力発電」などと並んで、エネルギー供給側の効率向上技術として「超電導高効率送電」が取り上げられている。

「超電導高効率送電」の具体的内容は必ずしも明確ではないが、単に、送電損失が少ない技術との捉え方だけではなく、自然エネルギー発電が大量に導入され、発電の変動が大きい電力系統となった場合でも効率よく送電することを可能とする技術も含まれているものと考えられる。このように考えれば、超電導発電機、超電導ケーブル、超電導変圧器など直接、電力を発電し送電する技術ばかりではなく、超電導調相機、超電導エネルギー貯蔵装置、超電導限流器など、電力系統の運用および保護を支える技術も「超電導高効率送電」に含まれる。

このように、地球環境問題は超電導技術を最大限に活用し解決を図るべき問題である。さらに、最近では、地球温暖化問題への「適応」として、温暖化が起こってしまった世界において、産業活動を含め人類の活動がどのように温暖化に対応していくかも重要な研究課題となっている。「適応」において、どのように超電導技術が活用できるかに関しては、まだほとんど検討例が無いものと思われるが、少なくとも超電導の兄弟技

術である低温技術では高効率の冷房技術など、活躍の場は多々あるものと予想される。

3. エネルギーセキュリティ

エネルギーセキュリティの確保においては超電導技術の活用方策は少ないように感じられるが、果たしてそうだろうか。確かに、超電導技術はエネルギー源の確保と直接結びつきにくい、トカマク式核融合発電装置あるいは MHD 発電装置の超電導マグネットのように、エネルギーを発生させる場を構成する技術としては必要不可欠である。また、省エネルギー技術がエネルギーセキュリティの向上に役立つと考えれば、ほとんどの超電導電力技術は関係することになる。さらに、多くの識者が提案されている、砂漠などでの大規模太陽光発電による電力を超電導ケーブルにより地球規模で送電する技術は、エネルギーセキュリティへの対応技術そのものである。大きな構想により、超電導技術の有効な応用を考えるべき時のように思われる。

4. 超電導材料の役割

発送配電などの超電導電力応用技術が地球環境問題への対応およびエネルギーセキュリティの確保に対し貢献できる技術となるためには、経済活動における技術的手段として選択される必要がある。すなわち、性能はもとより経済的側面においても魅力的であることが必要不可欠である。超電導電力機器に関する多くの概念設計研究、FS 研究の結果によれば、このような技術的性能、経済的メリットを左右するのは超電導線材の特性である。従来の銅と鉄の特性を活用した電力機器を大きく凌駕する魅力がなければ、超電導技術の導入と浸透は難しい。

超電導材料の研究開発においては、どのような使用条件でその材料が有する超電導特性が最大限に発揮できるのかを意識しつつ開発し、それを明示することが必要である。例えば、超電導エネルギー貯蔵装置に用いる超電導線材では、ピンニング力が最大となる条件がほぼ最適使用条件である。

個別の電力機器においては超電導材料に求められる条件はそれぞれ異なるが、磁界と電流の相互作用が大きい超電導電力機器においては、臨界電流、交流損失、機械的特性の三大特性が鍵となっているのは言うまでも無い。

5. おわりに

洞爺湖サミットを目前にした地球環境問題への関心の高まりは、超電導技術にとってその役割を果たすべき、絶好の機会であると考えられる。発送配電などの電力技術だけにとらわれず、広範な議論を展開したいものである。

LHDヘリカルコイルの過冷却(サブクール)運転における常伝導伝播挙動

Behavior of propagation of a normal-zone in the LHD helical coils cooled by subcooled helium.

今川 信作, 尾花 哲浩, 柳 長門, 濱口 真司, 関口 温朗, 三戸 利行 (NIFS); 岡村 哲至 (東工大)
 IMAGAWA Shinsaku, OBANA Tetsuhiro, YANAGI Nagato, HAMAGUCHI Shinji, SEKIGUCHI Haruo,
 MITO Toshiyuki (NIFS), OKAMURA Tetsuji (Tokyo Institute of Technology)
 E-mail: imagawa@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

大型ヘリカル装置(LHD)のヘリカルコイルでは、コイル入口に追加した熱交換器により、コイル入口温度を4.4 K飽和から3.2 Kまで下げることが可能となっている[1]。常伝導伝播が生じ得る最小の電流値(動的な最小伝播電流)が、4.4 K飽和ヘリウム冷却の場合の11.0 kAに対して、コイル出口3.8 Kの場合には11.5 kA付近にまで上昇することが確認されている[2]。常伝導部の発生起点については、飽和ヘリウム冷却の場合にはコイル最下部付近に限定されているのに対して、サブクール運転時にはヘリカルコイル最上部付近からの発生も観測されている。常伝導部伝播の位置を特定するため、コイル長手方向に沿ってピックアップコイルが約0.6 mピッチで配置されている。サブクール運転において3回の常伝導伝播と回復が観測されているが、飽和ヘリウム冷却と比べると、このピックアップコイルの信号レベルが明らかに異なっている。また、バランス電圧から求めた常伝導部の長さにも明らかな差が観測されており、これらについて考察する。

2. 測定データの比較

サブクール運転時および飽和ヘリウム冷却時の常伝導伝播の代表的なデータを図1a, bに示す。HI-HM/0.9は、最内層のH-Iブロックのバランス電圧から中間のH-Mブロックのバランス電圧を係数を掛けて引いた電圧で常伝導部の長さに比例するものであり、伝播が止まった時点から常伝導部が短くなっていくことが分かる。どちらも#10セクターの最下部付近からの外周側へ常伝導伝播が始まり、各々、外側赤道部と最上部付近で停止したことが分かる。ピックアップコイルの出力は、サブクール運転時の方が明らかに小さくなっている。また、ピックアップコイル出力から常伝導伝播速度は大差がないと判断されるにも関わらず、常伝導部の拡大速度はサブクール運転時の方が小さいことが分かる。

3. 考察

ピックアップコイルの信号は、常伝導伝播に伴い、電流中心が超伝導燃線から安定化材に転流することによる磁界変化を検出するものなので、信号が小さいことはピックアップコイル近傍を通過する常伝導部の長さが短いことを意味している。このことはバランス電圧から求めた常伝導長さとも矛盾しない結果である。

図2にモデルコイルにおいて常伝導部の起点から1ターンだけ離れた位置の電圧タップの出力を示す。最小伝播電流付近で比較するとサブクール液体ヘリウム中の方が飽和ヘリウム中よりも明らかに回復が早い(飽和ヘリウム中では電流拡散に伴う発熱の減少に遅れて回復が始まる)こと、および、電流値上昇に伴って回復が遅くなることなどが分かる。LHDヘリカルコイルにおいて、サブクール運転時の常伝導長さが短い主要因は、一旦、常伝導転移した後の回復が早いことであると考えられ、モデルコイルと同じ現象である。

4. 今後の予定

LHDヘリカルコイルのサブクールによる冷却安定性の改善効果がモデルコイルよりも少ない原因として、局所的なサブクール度の低下が疑われている。常伝導部長さの変化率を指標として、モデルコイルとの比較を試みている。それらの結果についても報告する予定である。

参考文献

- [1] S. Imagawa, et al., Nuclear Fusion **47** (2007) 353-360.
 [2] 今川, 2007年秋季低温工学・超伝導学会予稿集, 2C-a07.

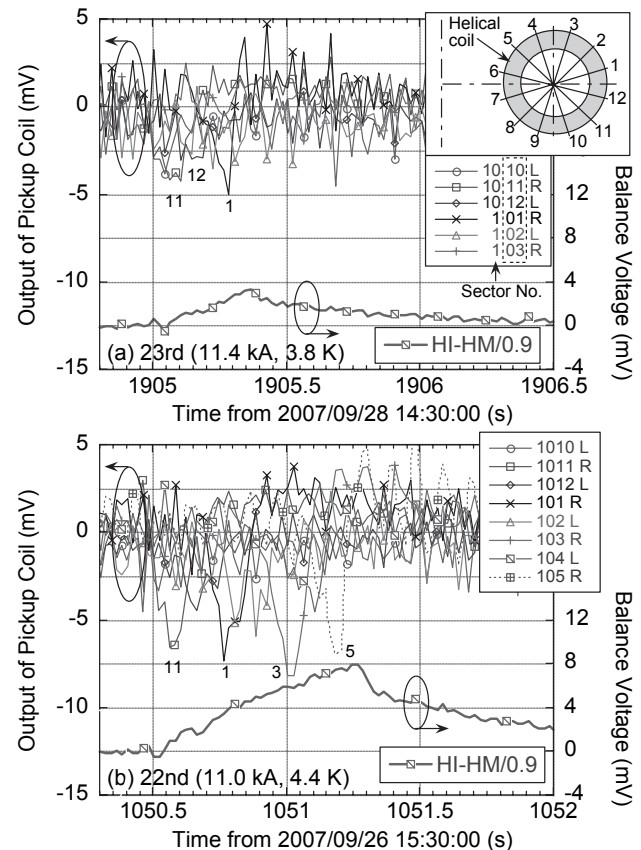


Fig. 1. Output of pickup coils and balance voltage of the helical coils during the (a) 23rd and (b) 22nd propagation of a normal zone.

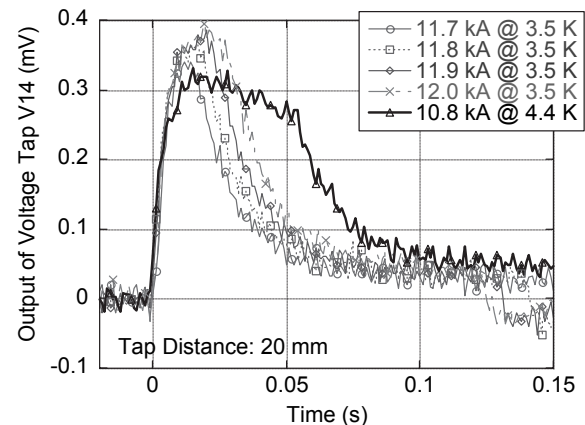


Fig.2. Output of a voltage tap during propagation of a normal-zone at the model coil cooled by saturated or subcooled helium.

LHD コイルの励磁方法に関する一提案

An Proposal on Excitation Method of LHD Coil

成蹊大学 石郷岡 猛, ニノ宮 晃, 川嶋 忍, 近藤 祐一
 ISHIGOHKA Takeshi, NINOMIYA Akira, Kawashima Shinobu, KONDO Yuichi

Seikei University
 ishigoka@st.seikei.ac.jp

1. まえがき LHD 用超伝導コイルは、大型マグネットであるため、励磁時の電磁力が極めて大きく、機械的応力に伴う AE 計測技術が状態推定に有力なものになる¹⁾。このため、LHD コイルにおける励磁電流パターンと AE 信号との関係に注目し、従来のデータを再検討すると共に、最適な励磁パターンについての提案を行った。

2. 励磁電流パターンと AE 一般に超伝導コイルの励磁時には AE 信号が検出されるが、励磁電流の増加時および減少時共に AE が発生し、電流一定保持時には発生しないという現象が見られる。この現象は、LHD コイルでも顕著に見られた。その一例を Fig.1 に示す。

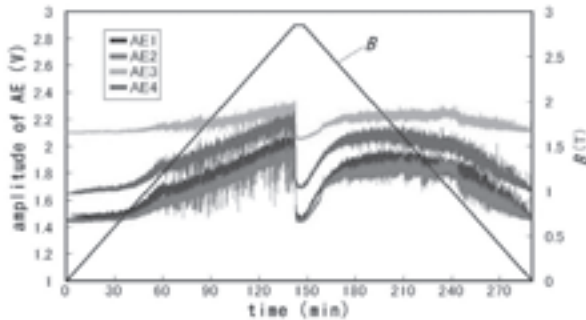


Fig. 1 AE from Helical Coil observed at Excitation

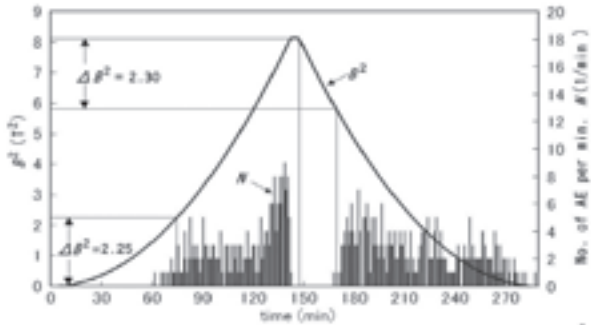


Fig. 2 Relation between Frequency of AE and B^2

また、AE 信号発生頻度と電磁力との関係を見るために、磁束密度の二乗(電磁力に比例)と、AE 信号発生頻度を一つのグラフに表したものを Fig.2 に示す。同図から、AE の発生頻度は磁束密度の二乗の増加率に比例すること、また、AE が発生し始めるのは電流一定保持状態からの電磁力(磁束密度の二乗)の増加分がある一定値を越えた場合であることが判る。AE が発生すると超伝導コイル内で損失が発生し、温度上昇が起こると推定される。このため、超伝導コイルの安定な運転のためには AE の発生を抑止すること、特に臨界電流に近い領域における AE の発生を出来る限り抑止することが必要であることが判る。

3. 最適励磁パターンの検討

前述の様に、超伝導コイルを安定に励磁するためには、励磁速度を出来る限り低くすることが望ましい。

そのために、今回、新たに、Fig.3 に示す様に三つの超伝導ヘリカルコイル、H-I, H-M, H-O の励磁を個別に行うこと、すなわち、最も内側で強磁界が掛かる H-I コイルを先ず定格値まで励磁し、次いで H-M コイルを定格値まで励磁し、さらに、H-O コイルを定格値まで励磁する方式を提案する。

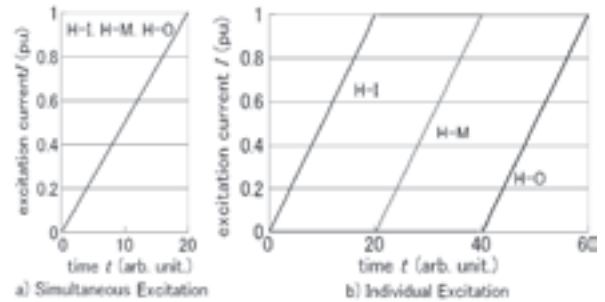


Fig. 3 Excitation Method

この場合、従来、励磁中常電導部の発生が比較的多く見られた H-I コイルにおける励磁完了直前における電磁力の増加率が低く抑えられることが判る。

Fig.4 に、H-I コイルに掛かる電磁力の増加パターンを示す。同図から、従来の三コイル同時励磁方式に比べ、先に H-I コイルを定格電流値にまで励磁して、その後、H-M、次いで H-O コイルをそれぞれの定格電流値まで励磁する本方式を採用すれば、同じ励磁時間に対して、H-I コイルの電磁力の増加速度は従来方式に比べ 1/6 になる。

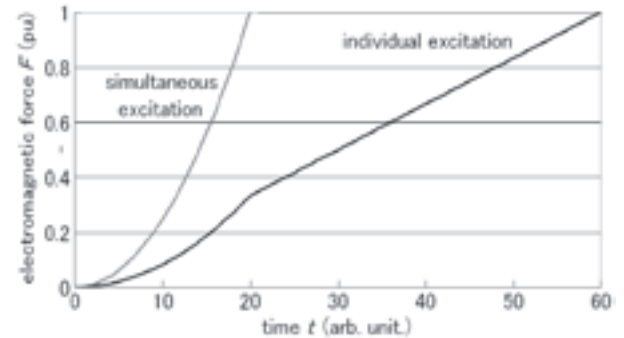


Fig. 4 Electromagnetic Force on H-I Coil

4. まとめ

以上の検討の結果、H-I, H-M, H-O の順に三コイルを個別に励磁した場合は電磁力の増加速度は低減し電磁力による擾乱の発生は減少してより安定な励磁が達成できるものと思われる

文献

1) T. Ishigohka, T. Tsuchiya, Y. Adachi, A. Ninomiya, N. Yanagi, K. Seo, H. Sekiguchi, S. Yamada, S. Imagawa, and T. Mito, "AE Measurement of the LHD Helical Coils", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.15, No.2, pp.1423-1426, July 2005.

LHD型核融合エネルギー炉を想定した大電流HTS導体の検討

Feasibility studies on large-current capacity HTS conductors aimed at LHD-type fusion reactor

柳 長門, 高畑 一也, 三戸 利行, 相良 明男 (NIFS); バンサル ゴーラブ (インド・プラズマ研究所); 岩熊 成卓 (九大)

YANAGI Nagato, TAKAHATA Kazuya, MITO Toshiyuki, SAGARA Akio (NIFS);
BANSAL Gourab (Institute for Plasma Research); IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ.)

E-mail: yanagi@LHD.nifs.ac.jp

1. 研究の背景と目的

LHD(ヘリカル)型核融合エネルギー炉(FCHR)の設計が物理および工学の両面から鋭意進められている。装置の大きさや磁場配位に関して検討が行われているが、現在の基本方針としては、ヘリカルコイルの大半径を14-18 m、小半径を3-4 mの範囲で設定している[1]。この装置の巨大で複雑なヘリカルコイルには、最大経験磁場13 Tにおいて100 kA級の導体が要求される。これにどのような超伝導線材を選択し、素線とそれを集めた導体をいかに構成すべきかは、重要な工学設計課題である。現在の基本案では、Nb₃SnあるいはNb₃Al線材を用いたケーブルインコンジット導体(CICC)を選択することが第一オプションであり、ITERで開発された技術の延長として設計可能と考えられる。ただし、ヘリカルコイルはソレノイド巻きとなるため、1本あたりの導体の冷却長を500 m程度に制限するためには巻線を5条持ちとして分割することが必要となり、冷却配管の取り出しや接続などに複雑な構造が要求される。こうした問題を回避することを考えると、第二オプションとして、ソリッド導体を用いた間接冷却方式も有力な選択肢となる。そこで、Nb₃Sn線材の平角撚線を転移させて、強固かつ巻線性の良いアルミ合金製ジャケットに収めた構造の導体が開発されている[2]。一方、ヘリカル型デモ炉の建設に実際に想定できる時期が今から少なくとも15年程度は先であるため、高温超伝導(HTS)コイルを採用することも選択肢のひとつとして考えられる。HTSコイルを用いると、運転に必要な冷却パワーを低減し経済的に優れた核融合炉にできるだけでなく、導体の高い臨界温度と熱容量によって間接冷却による限られた冷却条件においても極めて安定なコイルを実現できると期待される。そこでこれを第三オプションと位置付け、技術課題の抽出や導体開発のための基礎研究を立ち上げている[3,4]。

2. HTSコイルオプション

HTSコイルオプションでは、運転温度を20-30 Kとして、電流量はLTSオプションと同様に100 kAと設定している。Fig.1(a)に、現在提案している導体の基本構成を示す。ステンレス(あるいはアルミニウム合金)製のジャケットの中心にイトリウム系テープ線材を単純に積層し、ホットスポット温度を低減するために安定化銅を両側に配置した構造としている。この導体は、以下の特徴を有する。

- (1) HTS線材は単純積層されており、線材間に電流分布の不均在生じると考えられるが、高い臨界温度と熱容量を有するため、安定性は問題にならない。
- (2) コイル巻線の各層においてHTS線材量のグレーディングを行い、常に負荷率を高く設定することで、電流分布の不均在(磁気遮蔽電流含む)による不整磁場は閉じ込め磁場に対して問題のないレベルに抑制できる。
- (3) HTS線材を導体中心に薄く配置することで、巻線歪みを十分に小さく抑えることができる(~0.05%レベル)。また、テープ線材が単純積層されており転移構造がないため、機械的に強固な導体になる。
- (4) コイルの半ピッチごとに導体を接続し、ヘリカルコイルを分割組立することも、原理的に可能である[5]。

3. 10 kA級プロトタイプHTS導体の試作開発状況

上記100 kA級のHTS導体を開発することを最終目標として、まずは10 kA級のプロトタイプ導体の試作と試験を開始した。最初の導体としては、銀シースBi-2223テープ線材を34本単純にスタックし、銅ジャケット(7.5 mm×12 mm)に収めた構造とした(Fig.1(b))。約1 m長さの導体を2本製作し、導体の周囲を熱絶縁するとともに、ヒータを用いて導体温度を制御し(4.2-30 K)、外部磁場8 Tの splitted コイル中で試験を行った。測定された臨界電流(11 kA@8 T, 20 K)は、線材のデータから磁場分布を考慮して求めた値に近く、導体化による劣化は認められない。また、導体表面に装着したステンレス製ヒータを用いて安定性実験を行ったところ、同サイズのヘリウムで冷却されたLTS導体をクエンチさせるエネルギーの数十倍を投入しても温度暴走することなく、極めて安定に通電できた[6,7]。次に、YBCO線材を用いた導体も試作して試験を行ったところ、さらに高い臨界電流を確認した(本結果については次回発表予定)。一方、YBCO線材を用いた縮小導体で曲げ試験を行い(Fig.2)、導体構成の工夫による歪みの抑制についても検証しており、その結果についても報告を行う。

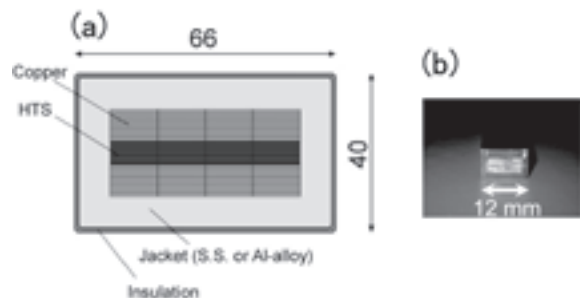


Fig. 1 (a) Proposed 100 kA-class HTS conductor and (b) a proto-type 10 kA-class conductor (Bi-2223 version).

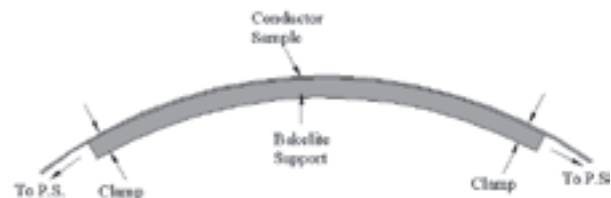


Fig. 2 Experimental setup for bending tests of YBCO conductors.

参考文献

- [1] A. Sagara et al., Fusion Eng. Des. **81** (2006) 2703.
- [2] K. Takahata et al., Fusion Eng. Des. **82** (2007) 1487.
- [3] T. Hemmi et al., NIFS Annual Report (2007) 278.
- [4] G. Bansal et al., to be published in Plasma and Fusion Research
- [5] H. Hashizume et al., J. Plasma Fusion Res. **5** (2001) 532.
- [6] N. Yanagi et al., Abstract of CSJ Conference **77** (2007) 163.
- [7] G. Bansal et al., to be published in IEEE Trans. Appl. Supercond.

異なる断面形状の CIC 導体における結合電流ループの実効的鎖交面積の考察

Investigation of the effective cross sections of the coupling current loops in different shape CIC conductors

谷貝 剛, 柴田 健志, 大村 惇, 津田 理, 濱島 高太郎(東北大学); 布谷 嘉彦, 奥野 清(原子力機構); 高畑 一也(NIFS)
 YAGAI Tsuyoshi, SHIBATA Yasuyuki, OMURA Jun, TSUDA Makoto, HAMAJIMA Takataro (Tohoku University); NUNOYA
 Yoshihiko, OKUNO Kiyoshi (JAEA); TAKAHATA Kazuya(NIFA)
 E-mail: gaiya@ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

超電導電力貯蔵装置や核融合実験装置においては、10T 前後に及ぶ磁場発生のために、大電流通電が可能で、かつ強大な電磁力に耐え得る導体が必要であり、これらの装置では一般にケーブル・イン・コンジット導体(CIC 導体)が用いられる。この導体は、直径 1mm 程度の超電導素線を多数段にわけて撚り合わせ、金属のケース(コンジット)に収納した構造を持つ。コンジットの形状は2種類あり、一つは NIFS の LHD 等で採用されている矩形断面、もう一つは ITER の CS コイルに代表される円形断面である。

大型の CIC 導体で特に興味深い研究対象となっているのは、素線間結合損失である。変動磁界に晒されることによって撚り線導体に誘導起電力が発生し、素線同士の接触によって形成されるループに沿って結合電流が流れることで、接触部においてジュール損が生じることが、この損失の原理である。本グループでは、導体内部に形成される結合電流ループと変動磁界の鎖交面積を定量的に解析するため、素線軌跡の3D計測装置を構築した[1]。これまで 1m 長 81素線円形導体と 210mm 長 486 素線導体(LHD の OV コイル導体)について測定を行い、導体内部構造の可視化に成功した。

2. 研究目的

素線同士が接触すると、図 1 のようにループが形成される。変動磁界が印加されると、素線と素線の接触部をパスとする結合電流 I_s が流れる。この電流を駆動する電圧は、変動磁界の時間変化と鎖交面積に比例する。幾何学的に対称な撚り線導体では、鎖交面積はお互いに打ち消し合うため、正味の誘導起電力は発生しない。しかし実際の CIC 導体では、電流密度を高め、かつ電磁力印加時の素線移動による摩擦熱を防ぐために、ポイド率を 38%以下にしており、撚り線導体は圧縮される。これにより、素線配置は幾何学的対称ではなくなるが、これまでの研究で明らかになった[2]。すなわち打ち消されずに残った正味の鎖交面積が、素線間結合損失の発生に寄与する。本研究では、矩形と円形のコンジット形状の導体について、素線軌跡の測定結果から、結合電流ループと正味の鎖交面積の違いを定量的に評価することを目的とする。

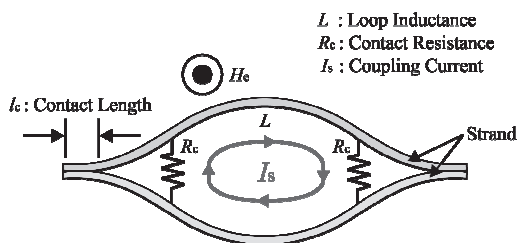


Fig.1 Schematic of the coupling current loop and the cross section of changing magnetic field.

3. 実験装置

実験は、本グループと(株)システムリンケージ社との共同開発で製作された素線軌跡3D計測装置を用いた[1]。素線軌跡の測定サンプルは、81 素線円形導体と 486 素線矩形断面導体の2種類である。これらの仕様を表 1 に示す。

Table.1 Specifications of the sample CIC conductors

	Round shape	Rectangular shape
Strand Material	NbTi/ Cu	NbTi/Cu
Surface Coating	bare	Bare
Construction	3×3×3×3	3×3×3×3×6
Twist Pitches[mm]	65×90×150×270	70×120×170×250 ×400

4. 実験結果と考察

図2は、円形導体と矩形導体の結合電流ループ面積に対する正味の鎖交面積をプロットしたものである。素線軌跡に比較的周期性がある場合には、鎖交面積の打ち消し効果が大きくなり、正味の鎖交面積は小さくなる。図2(a)の円形断面の場合には、正味の鎖交面積は斜線から大きく外れ、ループの面積が大きくなっても、鎖交面積は小さい。一方、(b)の矩形断面の場合には、ループの面積に比例して正味の鎖交面積が増加する傾向が確認された。詳しい素線軌跡の解析の結果、素線がコンジットの内壁の直線部分に強制的に沿わされることが原因と考えられる。すなわち鎖交面積の打ち消しを最大にし、発生する結合損失を最小にするには、円形断面の方が適していると言える。

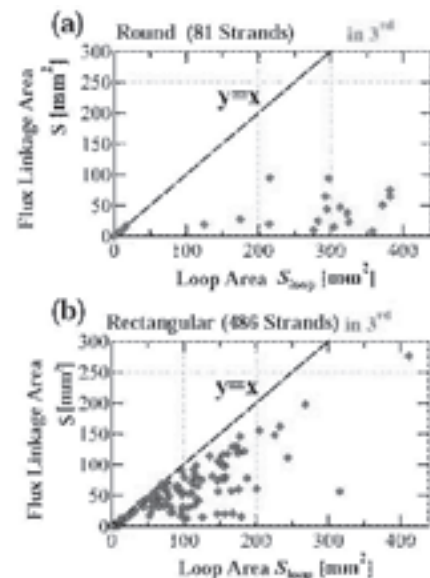


Fig.2 Relation between flux linkage area and coupling current loop area in two types of the conduit.

参考文献

1. T. Yagai et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.208
2. T. Yagai, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 16 (2006) p.835

ビーム輸送用超伝導カーブダイポールコイルの設計研究

Design study on a curved dipole superconducting coil for beam transport

尾花 哲浩(NIFS); 荻津 透, 山本 明(KEK); 吉本 政弘(原子力機構); 折笠 朝文(東芝)
 OBANA Tetsuhiro(NIFS); OGITSU Toru, YAMAMOTO Akira(KEK); YOSHIMOTO Masahiro(JAEA);
 ORIKASA Tomofumi(TOSHIBA)

E-mail: obana.tetsuhiro@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

粒子線がん治療や高エネルギー物理実験などの分野で、利用が期待されるビーム輸送用超伝導ダイポールマグネットの開発研究を進めている。ビーム輸送用ダイポールマグネットは超伝導化により、ビームラインのコンパクト化、軽量化、更に省エネルギー化を実現することが可能となる。本研究では、ビームを効率良く偏向させるために、鞍型コイルを長手方向に沿って曲げた形状を有するカーブコイル形状を基にした、超伝導ダイポールコイルの最適化設計に取り組んだ。今回は、超伝導カーブダイポールコイルの設計手法、及び設計したコイルの詳細について報告する。

2. カーブダイポールコイルの設計

鞍型形状を有する従来のダイポールコイルを、長手方向に沿って曲げた際には、コイル形状の曲げの影響によって、ダイポール磁場の乱れが起きる。そこで、コイル形状の曲げ及びコイルエンド部による磁場分布への影響を考慮しながら、粒子の通過する軌道上での積分磁場 BL (式(1))が設計要求を満たすようなカーブダイポールコイル形状の設計を試みた。その際、本研究で開発したカーブダイポールコイル用最適化設計コードを使用した。

$$BL = \int B_{(\theta)} ds \quad \dots (1)$$

ただし、 $B_{(\theta)}$ は垂直磁場、 s はビーム軌道の長さを示す。

本設計コードでは、始めにカーブコイル中央部におけるコイル断面の設計を行う。次に、そのコイル断面を基に、コイル形状を3次元化し、積分磁場を計算する。その計算結果は目標値と比較し、両者の差 (Δbn) を求める。 Δbn が閾値以下であればコイル設計を終了する。しかし、 Δbn が閾値を上回った場合には、 Δbn を考慮した新たな目標値を設定し、再びコイルの断面及び3次元形状を設計する。上記のような過程を繰り返すことで、 Δbn が閾値以下のカーブコイル形状を作り上げる。

3. カーブダイポールコイルの形状

重粒子線がん治療での使用を想定した設計パラメータ (Table 1) を基に、カーブダイポールコイルの設計を行った。本コイルに使用する超伝導線には、高精度のコイル巻線作業を実現する surface winding 法[1]に対応した径 1.3 mm の NbTi を採用した。Fig. 1 に、設計した20層カーブダイポールコイルの断面形状を示す。通常の鞍型ダイポールコイルと異なり、コイル形状の曲げによる磁場分布への影響に対応するため、左右非対称なコイル断面となっている。設計したコイルのターン数は 1542 であり、通電電流値を 395 A にした場合、コイル中心に磁場 3 T を発生することができる。その際、コイル上の最大経験磁場は、3.5 T である。Fig. 2 に、設計したコイルのロードラインを示す。その結果、コイル運転温度を 5 K 又は 6 K にした場合、負荷率はそれぞれ 5 割と 7 割程度となった。

Table 1 Design parameters of the curved dipole superconducting coil

Coil aperture	0.05 m
Good field region	0.03 m
Magnetic field strength at the coil center	3 T
Number of the coil layer	20
Bending radius	2.2 m
Bending angle	45 degree
Superconducting wire	NbTi
Wire diameter	1.3 mm
Cu ratio	2.4

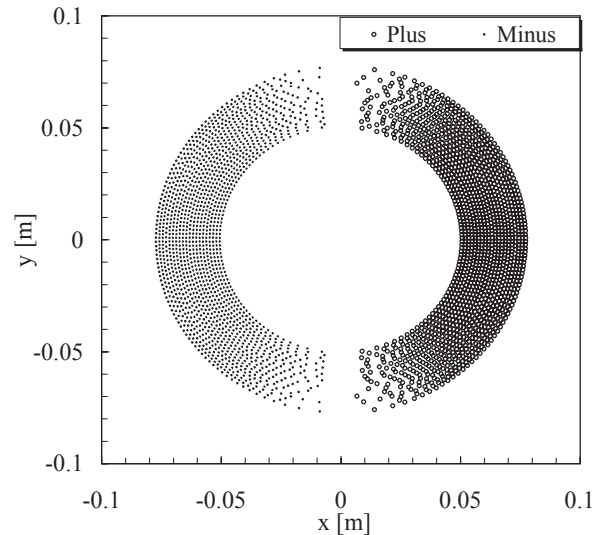


Fig. 1. Cross-section of the curved dipole coil.

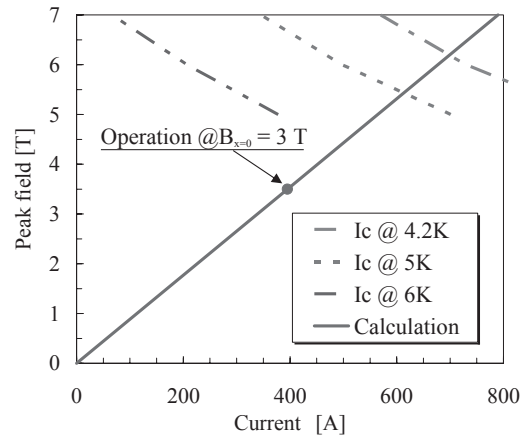


Fig. 2. Load line of the curved dipole coil.

参考文献

1. T. Obana, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.16, 2006, pp 216-219

飛翔体による宇宙観測用超伝導マグネットの開発 (11)

南極周回 25 日間飛翔・宇宙線観測実験におけるマグネット性能

Development of a superconducting magnet for scientific ballooning (11)

Magnet performance during 25 days long-duration scientific ballooning over Antarctica

植田 康博、山本 明、吉村 浩司、田中 賢、鈴木 純一(KEK); 篠田遼子、松田 晋也、長谷川 雅也、堀越 篤、坂井 賢一(東大); 水牧 祥一(東芝); 佐々木 誠(NASA)

MAKIDA Yasuhiro, YAMAMOTO Akira, YOSHIMURA Koji, TANAKA Kenichi, SUZUKI Junichi (KEK); SHINODA Ryoko, MATSUDA Shinya, HASEGAWA Masaya, HORIKOSHI Atsushi, SAKAI Kenichi(The Univ. of Tokyo); MIZUMAKI Shoichi (Toshiba); SASAKI Makoto (NASA)

E-mail; yasuhiko.makida@kek.jp, URL: http://bess.kek.jp/index-j.htm

1. はじめに

極薄肉超伝導ソレノイドを核とする宇宙線観測実験(BESS-Polar)装置の2回目の気球飛翔による観測フライトが2007年12月23日か25日間実施された。南極の米国マクマード基地近郊のウイリアムズフィールドから、Fig.1の写真のように大型気球によって打ち上げられ、約5時間後南極周回飛翔高度35~37kmに達し、Fig.2のような飛跡で安定した飛翔をつづけた。地上で永久電流モード0.8Tに励磁された超伝導ソレノイドは、地上性能以上の液体ヘリウムライフ25日を記録するなど、安定した性能で稼働し、16テラバイトに及ぶ宇宙線データ観測に貢献した。

2. BESS-Polar ソレノイド設計

ソレノイドは、Fig.3に示すように、伝導冷却源である液体ヘリウムタンクに連結した、直径0.9m、長さ1.4m、肉厚3.4mmの極薄肉コイルが2重円筒状の真空容器の中に収納されている構造を持つ。真空容器とコールドマスの間は蒸発ガス冷却の輻射シールドが2段(部分的に高温側1段追加)とスーパーインシュレーションが施されている。ソレノイドの仕様をTable1にまとめるが、その技術的な特徴は以下ようになる。

- 1) 高強度アルミ安定化超伝導線の特性を生かして、薄肉ソレノイドタイプでは必須であった、コイル外周のシリンダーを廃止し、エポキシ樹脂含浸の巻線のみでコイルを構成。
- 2) コイルの内外表面には純アルミストリップを貼り付けて正味のコイル熱伝導率を高め、クエンチ高速伝播によるコイル保護、定常時の伝導冷却性能の向上を図る。
- 3) 真空容器外筒は、アルミハニカム材を使用。
- 4) 1)~3)の施作で宇宙線と反応する物質量は $2.5\text{g}/\text{cm}^2$ まで削減されている。

3. 飛翔中のソレノイドの性能

ソレノイドは地上で永久電流モード励磁され、液体ヘリウムが全て蒸発した半日後に上空で消磁された。液体ヘリウムは地上と同じ状態になるよう、蒸発ガス出口は絶対圧制御弁が取り付けられ、モニターされたタンク圧力や蒸発量は1日周期でTable2にまとめたように101~103kPa、8~120/minで変動した。結果として、ヘリウムライフは21日から24日に伸び、平均熱侵入は0.85Wから0.74Wへと減少した。外部温度や大気圧など環境から断熱性能への影響の解析を進めている。



Fig. 1 The BESS-Polar was launched by a large scientific balloon in Antarctica on December 25, 2007.

Magnet Parameters	2nd
Coil nominal diameter (m)	0.9
Coil Length (m)	1.4
Coil Thickness (center/notch)(mm)	3.4 / 3.7
Coil Weight (kg)	43
Cryostat (Outer dimension) (m)	ϕ 1.06 × L3.2
(Inner bore) (m)	ϕ 0.80
Central magnetic field (T)	0.8 (1.0 tested)
Current (A)	380 (476 tested)
Stored Energy (kJ)	252 (~395 tested)
Material @half-wall (g/cm^2)	2.52
LHe Capacity (ℓ)	520
LHe Life Time (days)	21 (25 in flight)
Magnet weight (kg)	450
Conductor Parameters	
Type	Al clad NbTi/Cu cable
Overall size with insulation (mm^2)	0.9×1.2
Critical current (A) @2.5T, 4.2 K	> 750
Area ratio (NbTi/Cu/Al)	1/0.81/3.9
Additive into Al stabilizer	Ni (5000 ppm)
RRR (Al stabilizer, Cu, over all)	286, 55, 116

	On Ground	In Flight
Tank Pressure (kPa)	111	101 - 103
Coil Temperature (K)	4.5	4.5
1st Shield Temperature (K)	35 - 55	35 - 53
2nd Shield Temperature (K)	121 - 171	113 - 165
3rd Shield Temperature (K)	227	208 - 221
Total Evaporating Gas (ℓ/min)	11.9	8.0 - 12.0
LHe Life (days)	21	24

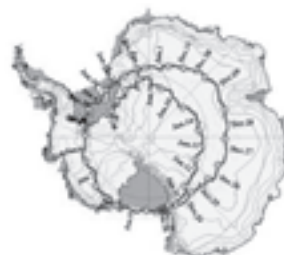


Fig. 2 The BESS-Polar left the 1.5 round anticlockwise track for 25 days flight over Antarctica.

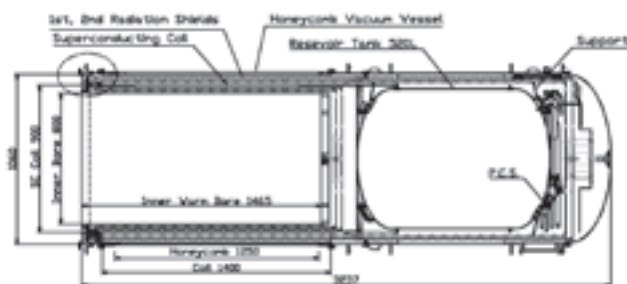


Fig. 3 Cross sectional view of the solenoid magnet.

J-PARCニュートリノビームライン用超伝導電磁石システム(16)

－ 電磁石システムの励磁試験結果及び実機製作状況 －

Superconducting magnet system for the J-PARC neutrino experiment (16)

－ Cold test results of magnet system assembled with cryostat and status report －

岡村崇弘, 佐々木憲一, 木村誠宏, 都丸隆行, 中本建志, 大島洋克, 飯田真久, 田中賢一, 菅原繁勝, 荒岡修, 笠見勝祐, 鈴木祥仁, 安島泰雄, 東憲男, 寺島昭男, 槇田康博, 荻津透, 山本明 (KEK); 市原直, 岡田泰之, 湊恒明, 中村英雄 (三菱電機)

T. Okamura, K. Sasaki, N. Kimura, T. Tomaru, T. Nakamoto, H. Ohhata, M. Iida, K. Tanaka, S. Sugawara, O. Araoka, K. Kasami, S. Suzuki, Y. Ajima, N. Higashi, A. Terashima, Y. Makida, T. Ogitsu, A. Yamamoto (KEK), T. Ichihara, Y. Okada, T. Minato, H. Nakamura (Mitsubishi Electric)
E-mail: takahiro.okamura@kek.jp

1. はじめに

現在、高エネルギー加速器研究機構(KEK)と日本原子力研究開発機構(JAEA)が共同で建設している大強度陽子加速器 J-PARC において、50 GeV-750 kW 陽子ビームを利用した次期ニュートリノ振動実験計画が進行中である。

これまで KEK ではニュートリノビームラインに使用される 2.6 T の 2 極磁場と 19 T/m の 4 極磁場を同時に発生する複合磁場型超伝導マグネットを開発し、プロトタイプ、実証機で製造過程及び性能に問題ないことを確認し、2005 年から実際にニュートリノビームラインに使用される実機の製作を行ってきている[1]。またこれらの超伝導電磁石をインストールするダブレットクライオスタット (以下ダブレットと略) と呼ばれる磁石システムに関する冷却励磁試験を行いその性能に問題が無いことを確認し量産体制に入っている[2]。

本報では超伝導電磁石ならびにダブレットの製作状況、これまで行ってきた冷却励磁試験結果ならびにニュートリノビームラインの建設状況に関して報告する。

2. 冷却励磁試験状況

超伝導電磁石の製作に関しては、現段階で 4 台の予備機を含んだ計 32 台のうち 28 台の製作及び 4.2 K 液体ヘリウム中での冷却励磁試験を終了している。具体的に行っている試験項目は励磁試験、ヒータークエンチ試験、コイルインダクタンス測定、磁場測定、フルダンプ試験であり、縦型クライオスタットへのインストールから試験終了まで約 2 週間かけて行う。これまで行ってきた 28 台全てに関して Fig.1 に示すように最大運転電流(7345 A)+5%の電流にトレーニングクエンチ無しで到達し、また良好な磁場性能が問題無く再現されており、さらにコイルインダクタンスに関する平均 14.12 mH と要求仕様を満たしていることが実証された。

一方ダブレットクライオスタットに関しては予備機を含めた 16 台中 14 台の製作を無事終了している。

3. ビームライン建設状況

ニュートリノビームラインには Fig.2 の写真に示すように、計 10 台のダブレットが搬入され、所定の位置に設置されている。現在は超伝導電磁石のアライメントに加えてダブレット間を接続するインターコネクタクライオスタットにおいて、ビームチューブ、冷却系配管の溶接、超伝導ブスバーの接続等が行われている。

4. 今後の予定

超伝導電磁石は 2008 年の 7 月までには全台数の製作及び冷却励磁試験を終了する予定である。11 月末までに冷却

系を含んだ全ての超伝導機器の設置が終了する予定である。そして 2009 年 1 月から全系一括での冷却励磁及びクエンチ試験を行う予定である。

参考文献

- [1] 佐々木 他：2006 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 1B-p12
[2] 岡村 他：2006 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 3B-p01

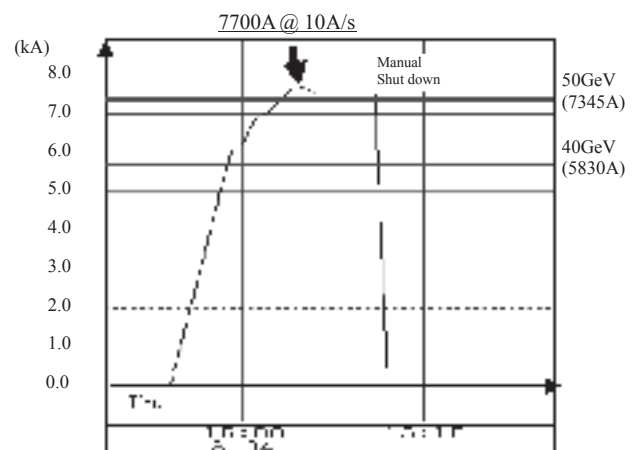


Fig.1 Example of the excitation test up to 7700A.



Fig.2 Superconducting combined function magnets installed in the J-PARC neutrino beam line.

低磁場 SQUID-NMR システムの開発 Development of low-field HTS-SQUID-NMR system

廿日出 好, 林 正浩, 奥野 伸也, 田中 三郎(豊橋技科大)
HATSUKADE Y., HAYASHI M., OKUNO S., TANAKA S. (TUT)
E-mail: hatukade@eco.tut.ac.jp

1. はじめに

核磁気共鳴(NMR)分光法は、核スピン磁化が印加静磁場に依存し、スピン共鳴周波数も静磁場に比例する。また、受信器として誘導コイルを用いることから、NMR の検出感度は静磁場強度の2乗に比例する[1]。そのため、従来のNMRは超伝導磁石を用いて数10T(¹H-NMRで数100MHzの共鳴周波数に対応)の強磁場を印加する。さらに強い磁場を印加すれば感度は向上するが、磁場強度を単純に高めるだけでは磁場の空間的不均一性も増大してしまい、信号スペクトル線幅が増加、すなわち周波数分解能が低下する。これを避けるためには、磁石の大型化、あるいはシムコイルなどによる磁場補正が必要となり、装置コストが増大する要因となっている。

そこで現在、地磁気程度(数10 μ T)の低磁場を印加する低磁場NMRに注目が集まっている[2]。上記のような低磁場ならば簡易な電磁石を用いればよく、低コスト、簡便性、可動でオープンなどのアドバンテージが見込まれる。しかし、低磁場ではNMR信号が低周波数(¹H-NMRで数kHzの共鳴周波数)となり、信号強度も弱いため従来の誘導コイルでは検出が困難である。一方、HTS-SQUIDは低周波数帯域でも超高感度な磁気センサであり、現在、LTS-SQUIDの感度に約1桁までせまる10fT/Hz^{1/2}まで高感度化されている。このため、HTS-SQUIDを用いた低磁場SQUID-NMRが実現すれば、低周波数共振のため数Hzという高い周波数分解能が期待できるだけでなく、低コストでデスクトップタイプのNMRもしくはMRI装置の実用化が見込まれる。そこで、本研究では、HTS-SQUIDを用いた低磁場SQUID-NMR装置の開発を行い、¹H-NMR信号検出および周波数分解能評価を行った。

2. 低磁場 SQUID-NMR 装置

本研究では、HTS-SQUID マグネトメータ、常温の静磁場コイルおよびパルス磁場コイルを用いた低磁場SQUID-NMR装置を磁気シールドルーム内に構築した(Fig.1)。図に示すように、HTS-SQUID マグネトメータはクライオスタット内にて約77Kに冷却される。SQUIDは垂直成分磁場 B_z を計測するよう設置した。サンプルは薄いサファイヤ窓と真空を介してSQUID上部に設置する。静磁場コイルとして直径約600mmの約200回巻きコイルを二つ直列に接続して、ヘルムホルツ型コイル構成とした。静磁場は図のx方向に印加する。一方、パルス磁場コイルには900回巻きの矩形コイル(100mmx80mm)二つを同様にヘルムホルツ型構成として用い、SQUIDとサンプルを挟んでy方向磁場が印加されるように設置した。静磁場、パルス磁場ともに、SQUIDに鎖交する磁束量が最小になるようコイル位置を調整する。静磁場コイルには約100mAのDC電流を供給し、パルス磁場コイルには約1Aの振幅をもつパルス電流を印加する。SQUIDへの鎖交磁束は最小になるよう調整したが、数mTのパルス磁場を用いた場合、SQUIDをこのような磁場中でロックしておくのは困難であった。そこでSQUID駆動回路のリセットをPCで制御して、パルス磁場印加中はロックを外しておき、パルス磁場をオフした瞬間からロックして計測するプログラムを作成した。本装置のNMR計測シーケンスをFig.2に示す。図に示すように数10 μ Tの静磁場を印加しておき、約5s間パルス磁場を印加する。パルス磁場をオフした後、SQUIDをロックさせ放出されるNMR信号を計測、PC内でFFTを行い、NMRスペクトラムを記録する。本装置のSQUID感度は約240fT/Hz^{1/2}である。

3. ¹H-NMR 検出と周波数分解能の評価

前述のSQUID-NMR装置を用いて、純水5mlをサンプルとして¹H-NMR信号の計測を行った。静磁場強度を30~100 μ Tとし、強度4mTのパルス磁場を4sサンプルに印加し、パルスオフ後に50kHzのサンプリングでNMR信号をSQUIDで計測した。静磁場30 μ Tを印加して100回加算平均を行った¹H-NMRスペクトラムをFig.3に示す。1238Hzにおいて振幅約0.5pT、線幅2.8Hzの¹H-NMR信号が得られた。この共鳴周波数は¹Hの30 μ T中の共鳴周波数 $\nu = \gamma B$ (γ は核磁気回転比42.68MHz, Bは静磁場強度)1280Hzとほぼ一致した。また、静磁場強度を変化させたときの¹H-NMR信号線幅と共鳴周波数の関係を調べたところ、NMR信号線幅は共鳴周波数 f に比例しており、近似線 $\delta\nu = 0.0015f + 1$ が得られた。この式において右辺第二項の自然線幅1Hzは本システムによる¹H-NMRの最小分解能を示しており、本低磁場SQUID-NMR装置が高周波数分解能を持っていることが示された。

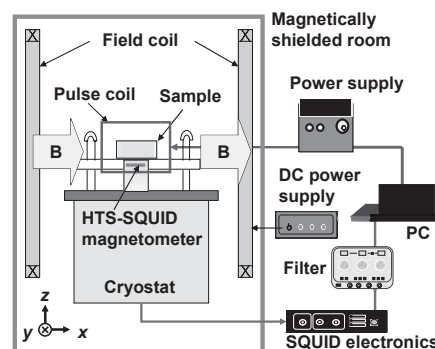


Fig.1 Diagram of low-field HTS-SQUID-NMR system.

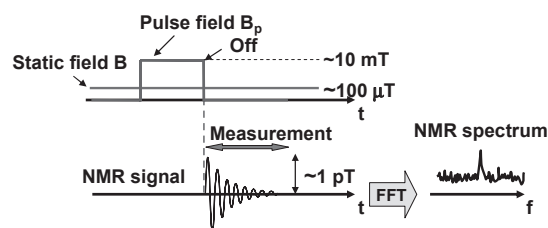


Fig.2 Measurement sequence of SQUID-NMR system.

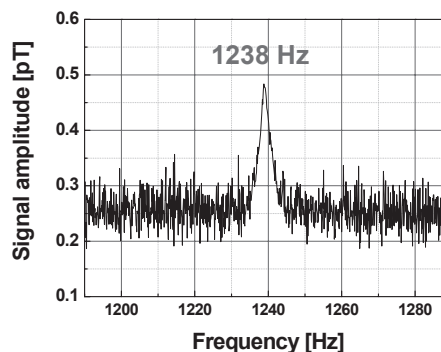


Fig.3 ¹H-NMR spectrum using B of 30 μ T.

参考文献

1. T.D.W.Claridge : High-Resolution NMR Techniques in Organic Chemistry, Elsevier Science Ltd. (1999)
2. R.McDermott, et al.: Science, Vol. 295 (2002) p.2247

直流超伝導ケーブルシステムの適用先と開発計画

Applications and Plans of DC Superconducting Power Transmission Line

山口 作太郎, 浜辺 誠, 高橋 道郎, 服部 敦, 飯吉 厚夫 (中部大)

YAMAGUCHI Satarou, HAMABE Makoto, TAKAHASHI Michio, HATTORI Atsushi, IIYOSHI Atsuo

yamax@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

中部大学では平成 17 年度より直流超伝導送電システムの実用化を目指した研究を開始し, 今までに 2 度冷却通電試験を行ってきた。そして, 当初に予定した研究結果を予定通り得つつある。このため, 次の実験装置を検討する時期に来ている。直流超伝導送電の最終的な応用先として地球規模の極めて大きな電力網を作る計画は公表されている。しかし, 実際にはもっと距離の短い送電システムから始めることが工学的に求められる。幸い家庭や工場などでは電力需要の 80% 程度が直流であり, 今後も直流利用は増加する。更に, 直流化によって送電損失が減少することが複数の既存システムで検討されているので, 石油価格の高騰はある意味では追い風になっている。例えば, データセンターがある。これらについて検討を行い, 開発計画シナリオを議論する。

2. 応用先としてのデータセンター

データセンター (DC) はインターネット利用の基幹部分をなし, ユビキタス社会を 2007 年現在で日本の電力の 5% を使い, 今後もますます発展すると予測されている。そして, 総務省の予測では 2050 年には 50% まで需要が増大する。Fig. 1 に現在一般的に利用されている DC の電力供給系を示す。DC は電力消費が大きいので, 一般に発電所や変電所近傍に設置されることが多い。そして,

日本では 66kV で給電する人が多いようである。電力を最終的にはサーバーやエアコンに供給する必要があるが, エアコンは電力消費の半分から 40% 程度である。これから分かるように, 電力は最終的には直流で利用されるが, 停電対策用のための UPS なども含めて何度も直流/交流の変換を行う。このため, 変換器の半導体素子や電池の損失が大きくなり, 現在ではこれが全電力の 35% から 40% を超すとされている。このため, 現在 DC の直流化が検討されているが, これに直流超伝導送電システムを応用した一例が Fig. 2 である。超伝導ケーブルは距離が短いと端部での熱浸入の割合が大きくなるので, 長い距離に適用することが望まれる。しかし, 短い距離から応用事例を積み上げていく必要があり, 距離は数百 m から 1km で電圧が 100V 以上あれば超伝導利用した効果が出てくると考えられる。

Fig. 2 では DC 内部での利用ではなくて, 発電所や変電所からの電力供給に利用する例である。したがって, 大学などでの研究機関で行う実験はこの程度まで行う必要があろう。尚, 電池は DC 側においても良い。超伝導システムでは実行抵抗が極めて低いので, 高圧を利用する必要がない。最終的に利用する電圧で送電することができるため, 電圧変換に伴う損失を低減できると同時に, 電圧が 600V 以下になっているため現在の日本の法令では高圧に分類されない。他の法令などの検討課題はあるが,

都市部などに設置されている DC では送電線の設置工事が住民からの了解を得る上でも容易になろう。尚, 端部での損失低減には, 中部大で長年開発を行ってきたパルチェ電流リードの利用が想定される。これによって, 超伝導送電システムの特長をより生かすことができる。DC のような電力利用は他にもあるので, 法令なども含めて適用が行いやすい事例から検討を進めるべきであろう。

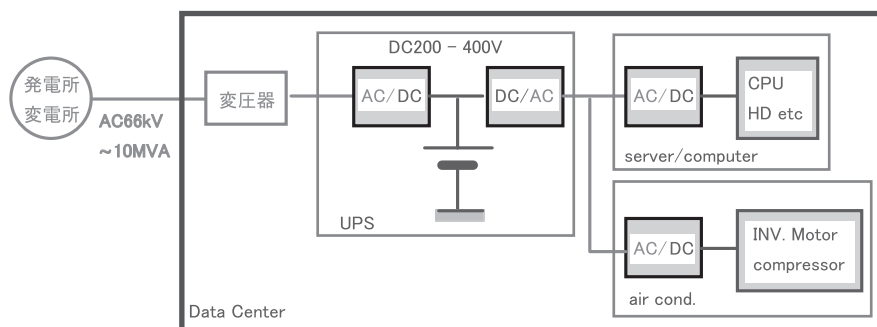


Fig. 1 The present Data Center Power Supply System.

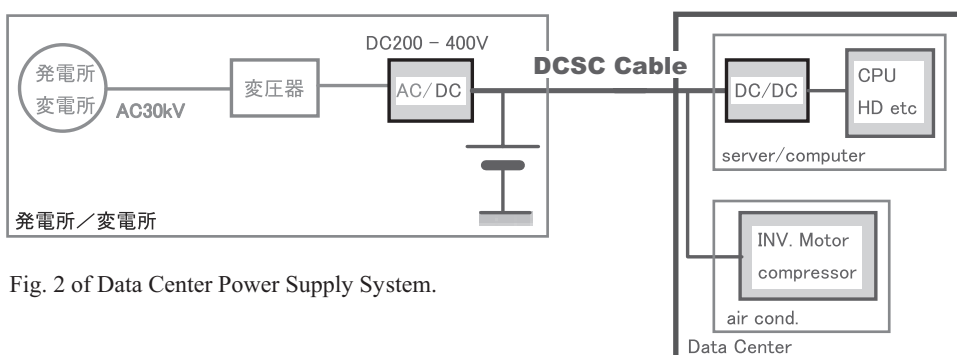


Fig. 2 of Data Center Power Supply System.

謝辞 本研究は文部科学省の社会連携研究推進事業 (平成 17 年度 ~ 平成 21 年度) による私学助成を得て行われた。また, DC について多くの関係者からデータ提供などを頂きました。感謝します。

直流超伝導送電ケーブル実験装置におけるペルチェ電流リードの通電試験

Operation of PCL on DC superconducting power transmission cable test stand

浜辺 誠, 佐々木 淳, 杉本 達律, 藤井 友宏, 那須 祐児, 山口 作太郎(中部大); ニノ宮 晃(成蹊大); 星野 勉(明星大); 石黒 康英(JFE スチール); 川村 邦明(前川製作所); KIM Arong, PARK Minwon(Changwon National Univ.)

HAMABE Makoto, SASAKI Atsushi, SUGIMOTO Tatsuori, FUJII Tomohiro, NASU Yuji, YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.); NINOMIYA Akira (Seikei Univ.); HOSHINO Tsutomu (Meisei Univ.); ISHIGURO Yasuhide (JFE Steel); KAWAMURA Kuniaki (Mayekawa MFG.); KIM Arong, PARK Minwon (Changwon National Univ.)

E-mail: hamabe@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

我々はこれまで、低温機器への電流リードからの熱侵入を下げる方法として、ペルチェ電流リード(PCL)を提案してきた。中部大学に建設された直流超伝導送電(DC Superconducting Power Transmission; DC SC-PT)ケーブル試験装置においても一部 PCL を使用しており、2006 年秋季の低温工学超伝導学会において、その初期冷却の結果を発表した[1]。ここでは、実際に DC SC-PT ケーブル試験装置に組み込んで通電したときの PCL の試験結果について報告する。

2. 直流超伝導送電ケーブル試験装置

中部大学で試験を進めている直流超伝導送電ケーブル試験装置の概略図を Fig. 1 に示す[2]。超伝導ケーブルは 2 層の HTS テープ線材で構成されている。そのうち、内層の 19 本に PCL(+側 N 型 BiTe 合金, -側 P 型 BiTe 合金)が、外層の 20 本には PCL の代わりに銅ブロックを用いた通常の電流リード(CCL)が、それぞれ HTS テープ線材(20 m)の 1 本ごとに接続されている。すなわち、19 組の PCL を同時に使用することで、使用した素子材料の性能差や組立てた PCL のばらつきを同時に評価することができる構成となっている。

3. PCL の性能試験

ペルチェ素子に使用される熱電材料の性能は性能指数 $Z = \alpha^2 \sigma / \kappa$ (α : ゼーベック係数, σ : 電気伝導度, κ : 熱伝導率)の大きさで評価される[3]。PCL に使用する BiTe 合金の性能指数 Z の温度特性を、これまで第 1 期～第 2 期冷却試験で使用してきたもの(#1)、および今年度の第 3 期冷却試験で使用する予定のもの(#2)とで比較したものを Fig. 2 に示す。Fig. 3 にはこれまでに得られた PCL (Fig. 2 の BiTe-#1 を使用)のペルチェ素子部(厚さ 8 mm, 断面 $10 \times 10 \text{ mm}^2$)の前後で得られた温度差、すなわちペルチェ素子部での温度分担を示す。Fig. 3 より、p 型、n 型共に通電により PCL 部での温度差は増加しており、n 型 PCL では最大 97.6 K の温度差が得られている。また、Fig. 3 中の曲線は Fig. 2 の物性値と真空内の電流リードの寸法から得られた解析値であり、実測値を説明できる結果が得られている。

2008 年春より開始する第 3 期冷却試験では、Fig. 2 にあるように BiTe-#1 より性能の高い BiTe-#2 を使用して、Fig. 3 で得られたよりもさらに高い電流で、かつ大きな温度分担を得ることができるような設計の PCL を一部導入する予定である。講演ではこの第 3 期の PCL の試験結果についても報告する予定である。また、超伝導ケーブル自体の通電試験結果についても報告する予定である。

謝辞 本研究は文部科学省の社会連携研究推進事業(平成 17 年度～平成 21 年度)による私学助成を得て行われた。

参考文献

1. M. Oue, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 75 (2006) p.107.
2. S. Yamaguchi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.178.

3. H. J. Goldsmid: "Thermoelectric Refrigeration", Plenum, New York (1964).

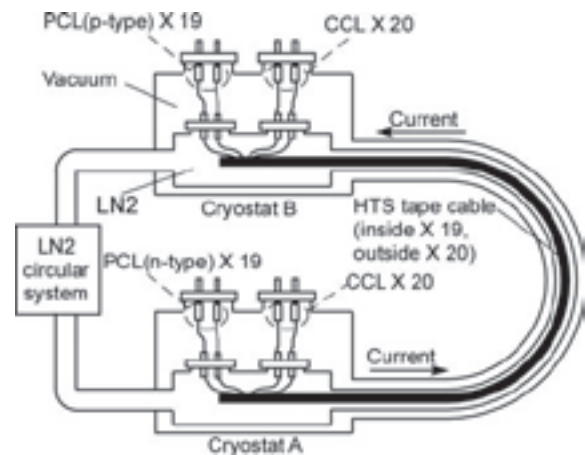


Fig. 1 A Schematic Diagram of DC SC-PT Cable Test Stand in Chubu University.

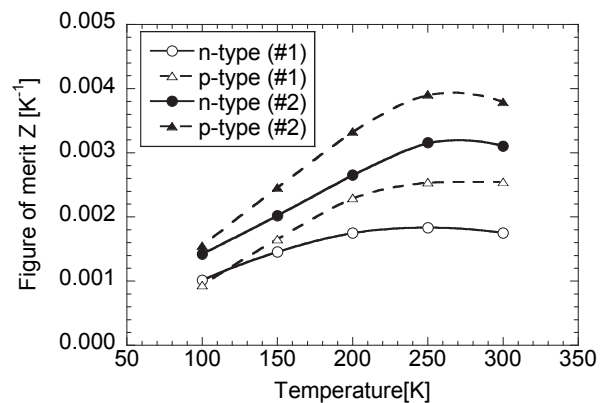


Fig. 2 Temperature Dependence of Figure of Merit in Various Types of BiTe for PCL.

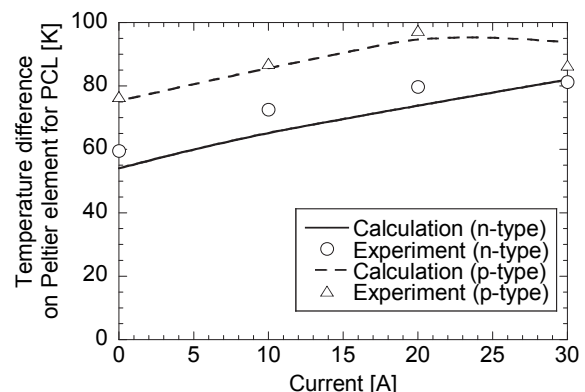


Fig. 3 Operation Current Dependence of Temperature Difference on Peltier Element in PCL using BiTe-#1.

直流超伝導送電の冷却ステーション間隔の検討

A numerical calculation on the distance of cooling stations for DC-SC power transmission line

佐々木 淳, 浜辺 誠, 山口 作太郎 (中部大学)

SASAKI Atsushi, HAMABE Makoto, YAMAGUCHI Sataro (Chubu University)

E-mail: te04011@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

中部大学の直流超伝導送電ケーブル試験装置のケーブル外径は 40 mm で、冷媒を循環させる内管内径は 80 mm である。通電電流を増加させるための方策として、ケーブル外径を大きくし、超伝導素線を増やすことが挙げられる。また、システムの小型化のためには配管内径の最小化が求められる。そこで、本研究ではケーブル外径と内管内径を変化させて冷却ステーション間隔が 10 km 以上となる条件を検討する。そして、その時の圧力損失およびポンプ動力を評価する。

2. 計算条件および評価式

ケーブル外径を 30~55 mm、内管内径を 70~90 mm の範囲で、侵入熱が 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 W/m のそれぞれに対して流速が 0.1 m/s と 0.2 m/s の場合について計算する。計算の簡単化のため内管をストレート管として計算を行う。

式(1)で冷却ステーション間の距離 L_{CS} を評価することができる。

$$L_{CS} = \frac{\rho C_p A_h \Delta T}{q_w} v \quad (1)$$

ここで、 ρ は密度、 C_p は比熱、 A_h は流路断面積、 ΔT は温度差、 q_w は侵入熱、 v は流速である。そして、物性値は $\rho = 860 \text{ kg/m}^3$ (@65 K)、 $C_p = 2000 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ (@65 K) とし、液温が 65 K ~ 85 K まで上昇すると仮定して $\Delta T = 20 \text{ K}$ とした。

式(2)でポンプ動力 W_{pump} を評価する。

$$W_{pump} = v A_h P \quad (2)$$

$$P = P_f + P_{add} \quad (3)$$

ここで、押し出し圧力を P とし、管摩擦による圧力損失を P_f 、加圧分を P_{add} (=0.3 MPa) とした。この P_f は次式により求める。

$$P_f = \frac{2f\rho v^2 L_{10}}{D_h} \quad (4)$$

ここで、 f は管摩擦係数、 D_h は代表長さ、 L_{10} は管路長 (=10 km) である。 f はレイノルズ数 Re を用いて式(5)で表わされる。

$$f = \frac{0.0791}{Re^{0.25}} \quad (5)$$

3. 計算結果

Fig. 1 に侵入熱が 1.0 W/m で流速が 0.1 m/s のときの冷却ステーション間の距離の計算結果を示す。横軸が配管内径で、縦軸がケーブル外径である。ケーブル外径 55 mm のときに 10 km 以上の距離をとるための配管内径は、流速 0.1 m/s のときに 85 mm 以上、0.2 m/s のときは 70 mm 以上と評価された。Fig. 2 に 10 km 流すためのポンプ動力を示す。しかし、図中の $L_{CS} < 10 \text{ km}$ の範囲は、Fig. 1 の結果より L_{CS} が 10 km 以下となる組み合わせである。配管内に三本ケーブルを設置する交流ケーブルでは、冷却ステーション間隔を 10 km 以上とするためには、ストレート管を使用すると仮定して流速 0.25 m/s で約 1 kW のポンプ動力であるので[1]、直流にして配管内にケーブルを一本とすればポンプ動力を 70 % 以上低減できる。Fig. 3 にレイノルズ数を示す。これより、 $Re > 10000$ とすれば冷却ステーション間隔を 10 km 以上にすることが可能であると評価できる。講演では 2.0 W/m 以上の侵入熱の結果についても報告する予定である。

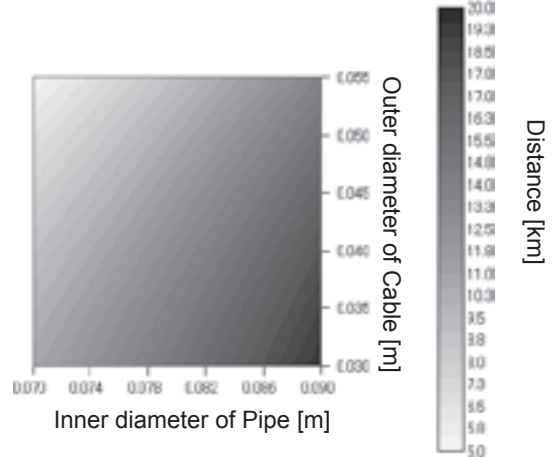


Fig. 1 Distance of cooling stations for $v = 0.1$ $q_w = 1.0$

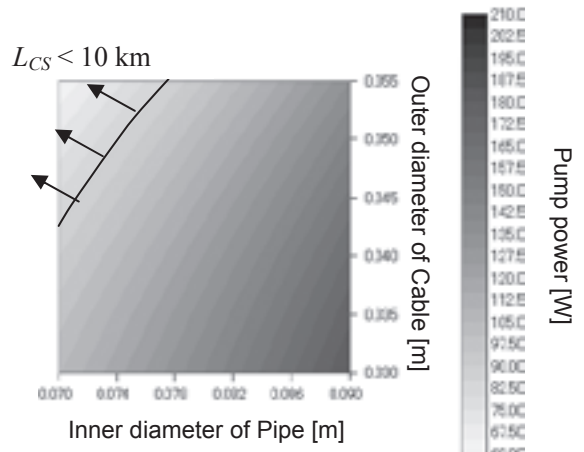


Fig. 2 Pump power for 10 km for $v = 0.1$ $q_w = 1.0$

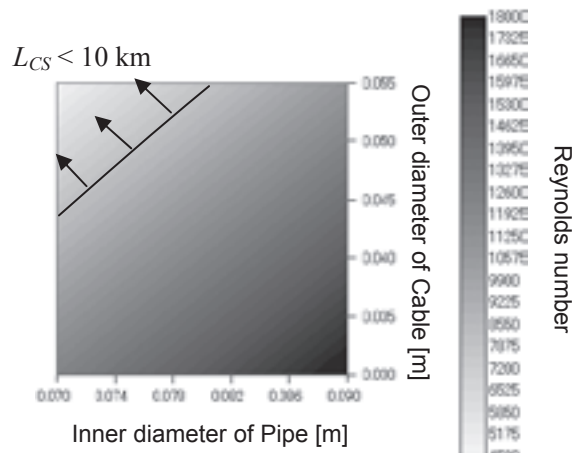


Fig. 3 Reynolds number for $v = 0.1$ $q_w = 1.0$

参考文献

1. A. SASAKI et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17, no. 2, pp. 1748-1751, June 2007

三相同一軸ケーブルの長距離特性の考察

Performance of a long HTS Tri-Axial transmission line

胡 南南, 添田 誠司 下山 和貴 オズジバン・ヌリ 谷貝 剛 津田 理 濱島 高太郎 (東北大)

HU Nannan SOEDA Seiji SHIMOYAMA Kazuki OZCIVAN Nuri YAGAI Tsuyoshi TSUDA Makoto HAMAJIMA Takataro (Tohoku Univ)

E-mail: hunannan@ecei.tohoku.ac.jp

1. Introduction

For long Tri-Axial Cable superconducting circuit analysis, transmission line model is classified by length. The balanced short transmission line circuit, which is less than 10km, ignoring capacitance, is described as an impedance circuit that only consists of inductance. Based on our previous investigation, the balanced three-phase currents and homogeneous current distribution in short cable can be realized by setting reasonable twist pitches. However, in a long transmission line (10-100km), the capacitances between each phase cannot be ignored anymore, and the circuit model, composed of pi segments, has an unbalanced phase distribution due to unsymmetrical parameters (capacitance) in the Tri-Axial structure. Therefore, in this paper, we propose a design to add an external capacitance which can compensate PI segment. Finally, the simulation of the modified cable is carried out using EMTP.

2. Electric Circuit (EC) model

2.1 PI model

A long cable should be modeled as PI circuit composed of serial connected concentric circular capacitances, which are represented by the real line in Fig.1 left. The unsymmetrical capacitances due to concentric phase structure are divided into two parts, and sandwiches the inductances in the PI model. Simulation parameter of inductance is calculated from (1)[1]

$$\left. \begin{aligned} L_s &= \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{r_k} + \mu_0 \pi r_k^2 \left(\frac{1}{l_{k,j}} \right)^2 \quad (j = 1,2) \\ L_m &= \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{r_k} + \mu_0 \pi r_i^2 \left(\frac{1}{l_{i,j}} \right) \left(\frac{1}{l_{k,j}} \right) \quad \text{For } r_k > r_i \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Where $l_{k,j}$ is the twist pitch of phase k, $l_{i,j}$ is the twist pitch of phase i; r_k is radius of phase k; μ_0 is the permeability of the free space; L_s is self-inductance, L_m is mutual-inductance.

The real capacitance is given by:

$$\left. \begin{aligned} C_a &= 0, \quad C_b = 0, \quad C_c = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(R/r_c)} \\ C_{ab} &= \frac{2\pi\epsilon}{\ln(r_b/r_a)}, \quad C_{bc} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(r_c/r_b)}, \quad C_{ca} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

The setting parameter is shown in (3):

$$\left. \begin{aligned} C_{11} &= C_a + C_{ab} + C_{ac}, \quad C_{12} = -C_{ab}, \quad C_{13} = -C_{ac} \\ C_{21} &= -C_{ab}, \quad C_{22} = C_{ab} + C_b + C_{bc}, \quad C_{23} = -C_{bc} \\ C_{31} &= -C_{ac}, \quad C_{32} = -C_{bc}, \quad C_{33} = C_{ac} + C_{bc} + C_c \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

C_a C_b C_c are the capacitances between phase and ground; C_{ab} C_{bc} C_{ca} are the capacitances between each phase; C_{xy} is setting parameter in PI segment; ϵ is the permeability of insulator; R is radius of shield.

2.2 Modified PI model

Since the unsymmetrical parameter (capacitance) in PI model is determined by the nature of concentric structure which cannot be varied, and as the line goes long, the unbalance current distribution become remarkable. Consequently, an

external capacitance, shown by following expression (3), is added to the circuit to compensate this unbalance distribution as the broken lines showing in fig.1 left.

$$C_a = C_b = C_c, \quad C_{ac} = C_{bc}, \quad C'_{ab} = C_{bc} - C_{ab} \quad (3)$$

In order to get a symmetrical structure, those external compensation capacitances are divided into two parts and sandwiches each PI segment.

3. Results

In this case, we take the transmission line of 50km's long, which is rated at 50Hz/66kV. EC model, connected with a 3-phase Y-coupling 5.5ohm resistance load, is performed to observe phase currents, neutral line current, and current unbalance rate. The result is illustrated in Table 1. As shown in Fig.2, a balanced Circuit is implemented by adding external compensate capacitances.

Table 1 The unbalance rate and neutral current of two models

	PI model	Modified PI model
Input current	10.35%	0.0054%
output current	0.92%	0.00035%
Neutral line current	110.32A	0.15A

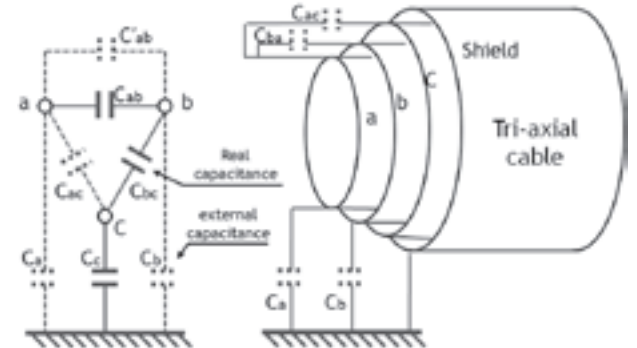


Fig.1 Real capacitance and external capacitance distribution

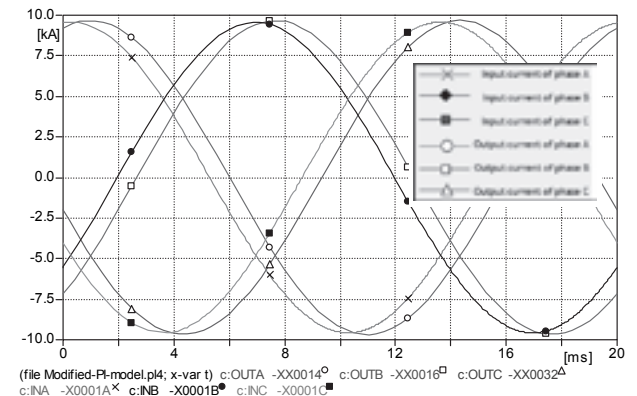


Fig.2 balanced input and output current

References

1. T. Hamajima, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.230

低損失 Bi2223 超電導ケーブル導体の開発 Development of low AC loss Bi2223 superconducting cable conductor

大屋 正義, 湯村 洋康, 増田 孝人(住友電工); 三村 智男, 鬼頭 豊, 本庄 昇一(東京電力)
OHYA Masayoshi, YUMURA Hiroyasu, MASUDA Takato (Sumitomo Electric Industries, Ltd);
MIMURA Tomoo, KITOHI Yutaka, HONJO Shoichi (Tokyo Electric Power Company)
E-mail: ohya-masayoshi@sei.co.jp

1. はじめに

超電導ケーブルは、大容量の電力をコンパクトな形状で、低損失に送電することが可能であり、早期の実用化が期待されている。これまでに筆者らは、Bi-2223 多芯超電導線材を用いた超電導ケーブルの開発⁽¹⁾を実施している。交流超電導ケーブル実用化の課題の一つとして、超電導部に発生する交流損失の低減が挙げられる。本発表では、交流損失を低減するために、線材の超電導フィラメントにツイストを施す等の改善が行われた低損失型 Bi-2223 超電導線⁽²⁾を用いて超電導ケーブル導体を作製し、その交流損失特性を測定したので、その結果について報告する。

2. 試料及び試験方法

導体を用いたフィラメントツイスト線材の主な諸元を表 1 に示す。本線材は、当社の標準的線材である DI-BSCCO® TypeH 線材 (4.3mm² × 0.23mm²) に対して、厚みを 20%程度低減し、さらに超電導フィラメントにツイストを施した DI-BSCCO® TypeAC 線材である。

TypeAC 線材を用いて作製した導体の諸元を表 2 に示す。導体は、TypeAC 線材を 4 層スパイラル巻きした導体層、及び 2 層巻きしたシールド層により構成されている。また、各層に流れる電流を均流化することを目的としたピッチ調整型導体特有の軸方向磁場に起因して、フォーマ内に発生する渦電流損失を低減するため、素線絶縁が施された極細線を撚り合わせた銅フォーマを用いた。

作製した導体の交流損失測定は、77K の飽和液体窒素中で行い、導体層とシールド層を往復通電した状態で、電気的端子法を用いて測定した。

Table1. Parameters of DI-BSCCO® TypeAC tapes

Items	TypeAC
Width (mm)	2.5
Thickness (mm)	0.18
Twist pitch (mm)	8
Ic (A) at 77 K	50~60

Table2. Specifications of the TypeAC cable conductor

Items	Specifications
Former	Cu stranded with surface insulation
HTS Conductor	TypeAC, 84 pcs / 4 layers
Dielectric	PPLP®
HTS Shield	TypeAC, 74 pcs / 2 layers
Protection	Cu tape / Kraft paper
Outer diameter	Approx. 43 mm
Length	2 m
Ic of Conductor	5100 A
Ic of Shield	3700 A

3. 試験結果及び考察

導体の交流損失測定結果を図1に示す。2kArms 通電時の、フォーマの渦電流損失を含む導体全体の交流損失 (50Hz 換算) は 1.1W/m であった。なお、同図中の実線は、多層導体モデル (ML-UCD model) を用いて超電導導体の交流損失を計算した結果である。本モデルは Bean モデルに基づいた半無限平板に対する交流損失理論式を用いて、任意の電流分布に対する多層導体の交流損失を計算することができ、フィラメントツイストが施されていない Bi-2223 超電導線材 (TypeH) を用いた導体の交流損失特性をよく記述することができる。TypeAC 線材を用いた導体の交流損失は、多層導体モデルを用いた計算結果と比較して、2kArms 通電時で約 40%と小さく、TypeAC 線材を用いた超電導ケーブル導体の低損失化が実証された。

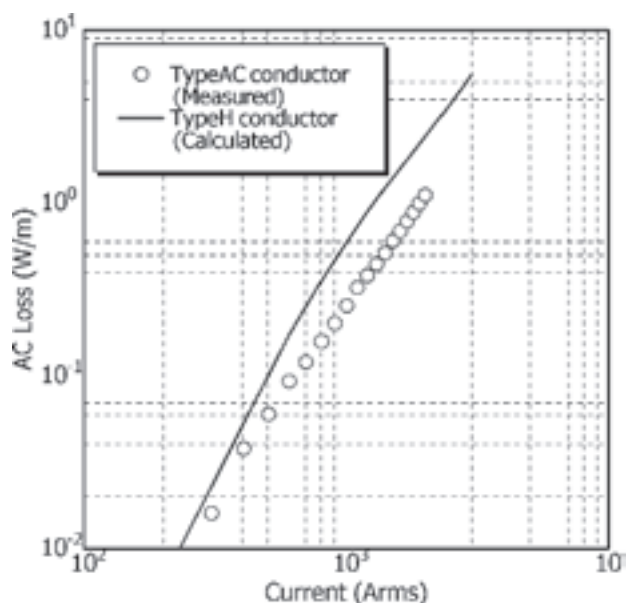


Fig.1 Measured AC loss in the TypeAC cable conductor and calculation result using ML-UCD model

4. まとめ

本試験結果より、TypeAC 線材を用いた超電導ケーブル導体が、従来の導体より低交流損失になることが確認された。尚、本研究の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構からの委託している「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」において、実施したものである。

参考文献

1. T. Masuda, et. al.: IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol. 15, No.2, (2005)
2. Y. Sasashige, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.65

低損失 10 m YBCO 超電導導体の開発

Development of 10 m YBCO HTS Conductor with Low AC Loss

八木 正史, 向山 晋一(古河電工); 長屋 重夫, 鹿島 直二(中部電力); 雨宮 尚之(京大); 塩原 融(超電導工研)
 YAGI Masashi, MUKOYAMA Shinichi (Furukawa Electric); NAGAYA Shigeo, KASHIMA Naoji (Chubu Electric Power);
 AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.); SHIOHARA Yuh (ISTEC-SRL)
 E-mail: m-yagi@ch.furukawa.co.jp

1. はじめに

200 m 長 2 本の IBAD-MOCVD の YBCO 超電導線材に銅テープの複合化とレーザによる細線化を行い、10 m の超電導導体を作製した。臨界電流と交流損失を評価した結果、68.8 K で臨界電流が 2450 A、交流損失 (1 kArms, 50 Hz) は 0.090 W/m と低損失を確認したので報告する。

2. 10 m Y 系超電導導体の仕様

10 m Y 系超電導導体の仕様を Table 1 に示す。YBCO 超電導線材 200 m 長 2 本は中部電力から提供され、仕様は Ag 安定化層 25 μm / MOCVD-YBCO 1.1 μm / PLD-CeO₂ 0.35 μm / IBAD-GZO 1.1 μm / ハステロイ 100 μm 、幅 10 mm であり、臨界電流(I_c)は約 100 A であった。この線材の Ag 安定化層上に幅 10 mm、厚さ 100 μm の銅テープを半田で複合させて、過電流対策とした。さらに、YAG レーザにより、5 分割 (幅 2 mm) に細線化した。しかし、幅 2 mm に完全に切り分けると、線材間の隙間を一定、かつ密に巻き付ける事が難しくなるため、点線処理 (完全に切断する箇所と切断しない箇所を設ける) をおこない、巻き付ける際に線材が折り曲げ可能な形状とした。

3. 10 m Y 系超電導導体の特性評価

作製した 10 m Y 系超電導導体の I_c を評価したところ、全体で 1489 A であり、長さ方向の分布で見ると、2-3 m で 1492 A、4.5-5.5 m で 1382 A、7-8 m で 1500 A であった。中央の 4.5-5.5 m の I_c が最も悪かったが、この結果は事前に測定した超電導線材の I_c 分布と一致しており、作製に伴う線材の劣化はなかった。交流損失 1 kArms の評価においては、I_c の容量が十分ではなく、Fig.1 のように導体をクライオ容器に入れて、内部を減圧し、液体窒素の温度をさげることで、臨界電流と交流損失を評価した。Fig.2 では 4.5-5.5 m 部位の VI 特性を示す。I_c は 77.3 K で 1382 A、73.1 K で 1894 A、68.8 K で 2450 A であり、横軸を I_c で規格化するとほとんど一致した。

過冷却時の交流損失 (50 Hz) の結果を Fig.3 に示す。1 kArms の交流損失は 68.8 K で 0.090 W/m (I_t/I_c=0.58) であり、目標とした 0.1 W/m 以下という低損失を確認した。しかし、この結果は 1 m 2 層導体の結果 [1] よりも悪く、また、Norris の strip モデルよりも 2.5 倍の損失である。これは 2 層から 3 層に多層化するに伴って、損失が増加する事、細線化した線材の一部の I_c が低下している事、が理由として考えられる。また、幅方向の J_c 分布も長さ方向で一様で無かったため、I_c の低い細線化線材を完全に取り除けなかった。今後、交流損失のさらなる低減には、I_c を上げて導体の層数を減らす事と、幅方向の J_c 分布を一様にする事が必要である。

4. 謝辞

本研究は、「超電導応用基盤技術研究開発」の一環として、ISTEC を通じて新エネルギー・産業技術総合開発機構の再委託により実施したものである。

Former	Cu stranded 200 mm ²
Length	10 m
YBCO tape	IBAD-MOCVD Length 200 m*2 5strips from 10mm-width original (I _c =100 A) 0.1 mm Cu tape soldered on YBCO
Tape width/ strips	2 mm/ 82 strips
Layer/ outer diameter	3-layer/ ϕ 21.1mm

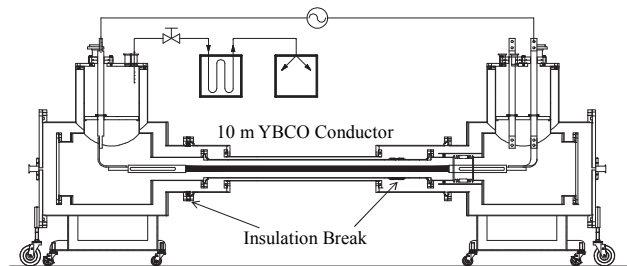


Fig.1 Experimental setup for 10 m YBCO conductor

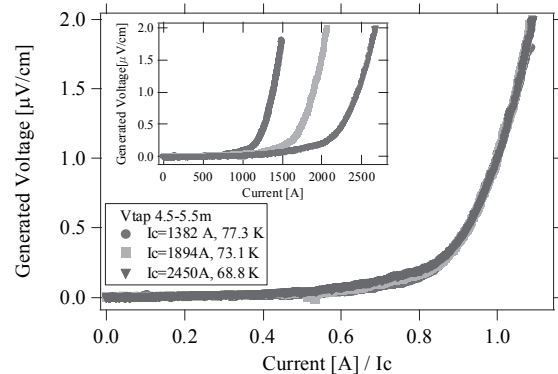


Fig.2 V-I characteristics of 10 m YBCO Conductor

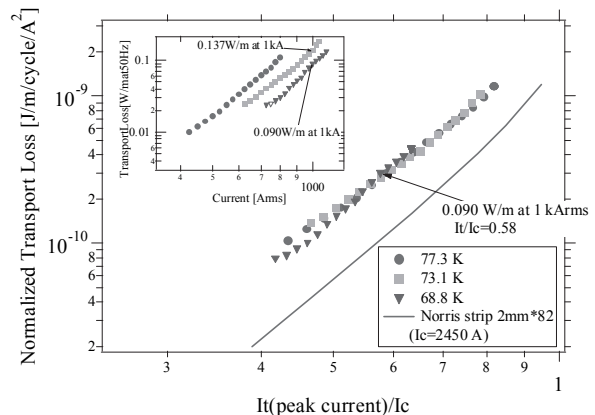


Fig.3 AC loss in 10 m YBCO Conductor

参考文献

1. M. Yagi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.95

Bi2223 超電導ケーブル導体の過電流特性

Over-current characteristics of Bi2223 superconducting cable conductor

大屋 正義, 湯村 洋康, 芦辺 祐一, 南野 忠彦, 増田 孝人(住友電工); 三村 智男, 鬼頭 豊, 本庄 昇一(東京電力)
 OHYA Masayoshi, YUMURA Hiroyasu, Ashibe Yuichi, MINAMINO Tadahiko, MASUDA Takato
 (Sumitomo Electric Industries, Ltd);
 MIMURA Tomoo, KITOH Yutaka, HONJO Shoichi (Tokyo Electric Power Company)
 E-mail: ohya-masayoshi@sei.co.jp

1. はじめに

66kV級の電力ケーブルには、最大で31.5kA-2secの耐短絡電流特性が求められる。超電導ケーブルは、大容量の電力をコンパクトな形状で送電することが可能であるが、一方で、短絡電流への対応が実用化に向けた課題の一つとして挙げられる。運転電流の数十倍の事故電流に対して超電導線を保護するためには、並列に常電導保護層を設けることが考えられるが、過剰な保護はコンパクトという超電導ケーブルの利点を消してしまう。筆者等は、低損失型 Bi-2223 超電導線⁽¹⁾を用いて、66kV 級ケーブルで一般的に使用されているφ150mm 管路に対応可能な、三心一括型超電導ケーブル向け導体コア⁽²⁾を作製し、その耐過電流特性を検証したので、検証結果について報告する。

2. 試料及び試験方法

低損失型 Bi-2223 線材⁽²⁾(DI-BSCCO® Type AC 線材)を用いて作製した導体の諸元を表1に示す。本線材は、超電導フィラメントを8mmピッチでツイストした線材の両面に、銅合金が半田付けされた3層構造となっている。試料導体はTypeAC線材を4層スパイラル巻きした導体層、及び2層巻きしたシールド層により構成されている。また、導体層及びシールド層に対する短絡電流対応として、フォーマには約140mm²の銅撚り線フォーマを用い、銅シールド層は約110mm²としている。導体の外径は約43mmであり、この導体をコアとした三心一括型超電導ケーブルがφ150mm管路に対応可能なサイズに収まるように設計されている。

短絡試験は、2本並べた試料導体の導体層に最大31.5kArms-2secの過電流をGo-Return通電し、この際、2本の試料のシールド層を両端でそれぞれ短絡接続することによって、シールド層には誘導電流が誘起されるような構成となっている。なお、試験は77Kの飽和液体窒素中で実施した。

Table1. Specification of the cable conductor

Items	Specifications
Former	Cu stranded (140mm ²)
HTS Conductor	TypeAC, 84 pcs / 4 layers
Dielectric	PPLP®
HTS Shield	TypeAC, 74 pcs / 2 layers
Protection	Cu tape (110mm ²) / Kraft paper
Outer diameter	Approx. 43 mm

3. 試験結果及び考察

31.5kA-2secの短絡電流通電時における、導体層及びシールド層の電流波形を図1に示す。シールド層には、導体層と位相が反転、振幅がほぼ等しい電流が誘起されており、2sec間の電流減衰もほとんど見られない。図2は、10~31.5kAの短絡電流を印加した時間と、導体層及びシールド層の最大温度上昇との関係を示しており、最大31.5kA-2sec印加時の導体層の温度上昇は約85K、シールド層の温度上昇は約110Kであった。本試験後に、試料導体のI_cを確認した結果、短絡電流印加によるI_cの劣化は見られず、作製した

導体は、3.15kA-2secの耐短絡電流特性を有することが確認された。

なお、実証試験が実施される系統において、短絡電流通過後に再送電が行われる最大条件は10kA-2secであり、この短絡電流に対する温度上昇は約7Kである。今後、この短絡電流を印加した直後に、導体が課電及び通電可能であることも検証していく。

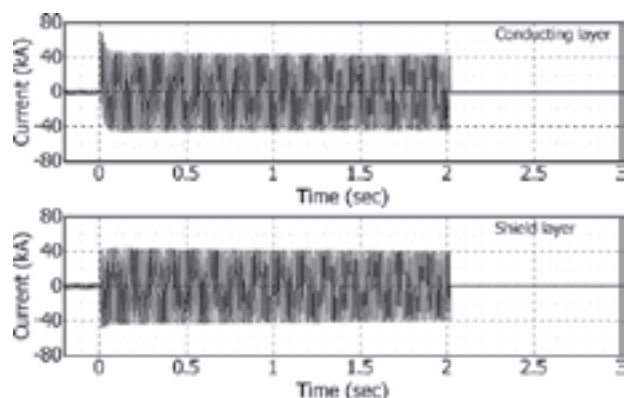


Fig.1 Waveforms of the current in the conducting and shield layers (31.5kArms-2sec)

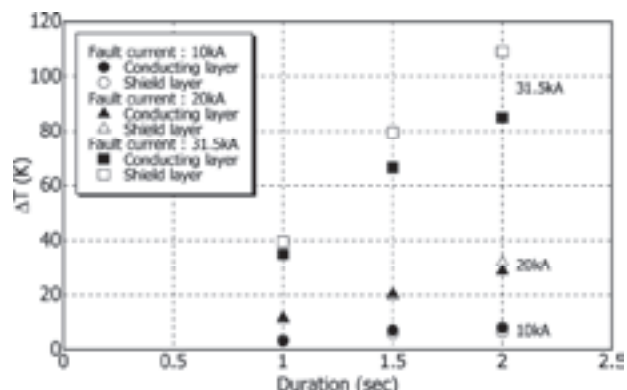


Fig.2 Maximum temperature rise in the cable conductor versus fault-current duration (31.5kArms)

4. まとめ

本試験結果から、作製した低損失型 Bi-2223 超電導導体は、66kV級の電力ケーブルに要求される3.15kA-2secの耐短絡電流特性を有することが確認された。

尚、本研究の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構からの委託している「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」において、実施したものである。

参考文献

- Y. Sasashige, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.65
- M. Ohya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, this conference (2008) 3C-a05

10m 級 YBCO 超電導ケーブルの過電流通電特性

Overcurrent Characteristics of 10-m YBCO Superconducting Cable

王 旭東, 植田 浩史, 石山 敦士(早大); 八木 正史, 向山 晋一(古河電工);
鹿島 直二, 長屋 重夫(中部電力); 塩原 融 (ISTEC-SRL)

WANG Xudong, UEDA Hiroshi, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); YAGI Masashi, MUKOYAMA Shinichi (Furukawa Electric);
KASHIMA Naoji, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Company); SHIOHARA Yuh (ISTEC-SRL)

E-mail: wan-x-don@ruri.waseda.jp

1. はじめに

YBCO 超電導ケーブルは、複数の YBCO 線材と銅フォーマが並列に接続される構成となっている。実系統応用では、これらの複合導体に運転電流の 10~30 倍程度の突発的な短絡事故電流が流入し、線材が劣化・焼損してしまう恐れがある。それゆえ、銅安定化層や銅フォーマを適切に設計する必要がある。我々は、耐過電流導体構成技術の確立を目指して、YBCO 超電導ケーブルの設計最適化に向けた検討を行っている。今回は、10 m 級 YBCO 超電導ケーブルに対して、31.5 kA_{rms}、2.0 s (66 kV 系統、JEC 基準) の過電流通電試験を行い、開発した計算機シミュレータにより実験を模擬して評価を行ったので報告する。なお同シミュレータの妥当性は、すでに発表した 1 m 級 YBCO ケーブルの試験結果との比較により検証済みである^[1]。

2. 実験

10 m 級 YBCO 超電導ケーブルの諸元を Table 1 に示す。本ケーブルは単相の超電導ケーブルであるが、3 芯一括構造を模擬するため、ダミーの銅フォーマ 2 本とともにツイストされている。またシールド層は、上記のダミー銅フォーマ 1 本と短絡し、閉ループを構成している。残りのダミー銅フォーマは開放されている。ケーブル作製に用いた YBCO 線材は IBAD/MOCVD 法で作製されたもので、Ag 層 (15 μm) 上に Cu 層 (100 μm) が半田接続されており、交流損失の低減のため 10 mm 幅から 2 mm 幅にスクライビング加工が施され、スパイラルに巻かれている。実験は液体窒素浸漬冷却の条件下で行い、31.5 kA_{rms}、2.0 s の過電流を導体部に通電し、シールド電流やケーブル内の温度上昇などを測定した。なお、ケーブル導体層の I_c は約 1500 A で、シールド層の I_c は約 420 A である (@77 K)。

3. 数値シミュレーション

3 次元有限要素法と回路方程式に基づく電流分布解析・熱解析連成プログラムを開発し、数値シミュレーションを行った。YBCO 超電導線材は 3 次元有限要素法を用いてモデル化し、 I - V 特性は n 値モデルにより表現した。電流分布解析は式(1)(2)、熱解析は式(3)を用いて定式化した。インダクタンス L および M は超電導層・シールド層を円筒で近似し、電流は円筒をスパイラル状に流れると仮定し、接触抵抗 R とともに集中定数とした。

$$\nabla \cdot \sigma(\nabla \phi) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} R_{\text{cond}} & 0 \\ 0 & R_{\text{shield}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} I_{\text{cond}} \\ I_{\text{shield}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{\text{cond}} & M \\ M & L_{\text{shield}} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} I_{\text{cond}} \\ I_{\text{shield}} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} V_{\text{cond}} \\ V_{\text{shield}} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} E_{\text{cond}} \\ \theta \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_j \quad (3)$$

式(1)の ϕ は電気スカラーポテンシャル、 σ は導電率である。式(2)の I は電流、 V は式(1)の場の解析より求まる YBCO 超電導線材の抵抗発生による電圧降下、 E は両端電圧である。添え字の cond は導体層および銅フォーマ、shield はシールド層を意味する。式(3)の T は温度、 C は熱容量、 k は熱伝導率、 Q_j は電流分布解析から求まるジュール発熱である。冷却条件は、ケーブルの最外層表面が液体窒素に触れているとして、液体窒素の非線形熱伝達特性を考慮した。

3. 結果

31.5 kA_{rms}、2 s の過電流通電 (0 - 2 s) に対するシールド電流 (I_{shield}) とケーブル内の温度上昇の実験結果を Fig. 1 に示す。シ

ールド電流は過電流通電中大きな変化がなく、通電電流 (I_c) の約 10% であり、位相が約 160° 遅れとなっている。これは、シールド層がダミー銅フォーマと短絡されているため、その抵抗分の影響だと考えられる。また過電流通電により、銅フォーマは約 160 K、HTS 導体層は約 145 K、HTS シールド層は約 85 K まで温度上昇した。なお解析については、現在シールド層に直列接続されたダミー銅フォーマの抵抗や接触抵抗などの抵抗分をパラメータとして評価を行なっている。詳細は学会にて発表する。

4. まとめ

10m 級 YBCO 超電導ケーブルに対して、31.5 kA_{rms}、2.0 s の過電流通電試験を行い、シールド電流や超電導ケーブル内の温度分布に対して評価を行なった。今後は、3 芯一括ケーブル構造のシミュレーションモデル開発を行なっていく予定である。

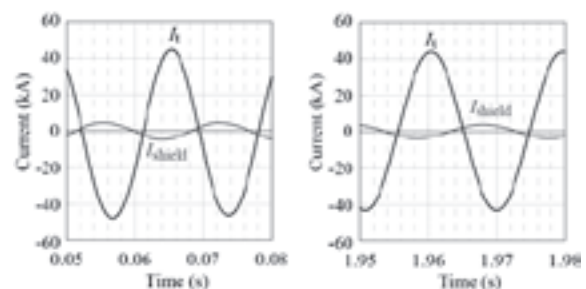
なお本研究は、超電導応用基盤技術研究体の一部として NEDO の委託により実施したものである。

Table 1 Specifications of 10-m YBCO superconducting cable

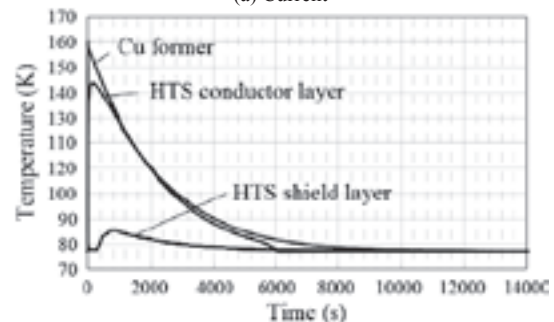
Structure	Contents
Cu former	Cu conductor 200 mm ²
HTS conductor layer	YBCO tape 3 layer
Cutape	0.1 mm ² 2 layer
Inner semi conductor	Carbon paper 2 layer
Electrical insulation	PRLP 0.5 mm (66/77kV class)
Outer semi-conductor	Carbon paper 2 layer
HTS shield layer	SC shield 1 layer
Cutape	0.1 mm ² 8 layer
Protection layer	Insulation paper, non woven cloth

※ the other two cores are dummy with former and dielectric

Thermal insulation pipes	Corrugated pipe with PVC Outer size : 140mm
--------------------------	--



(a) Current



(b) Temperature

Fig. 1 Experimental results with an over-current of 31.5 kA_{rms}, 2 s, 60 Hz

文献

[1] H. Ueda, A. Ishiyama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.177

抵抗温度計比較校正装置用Pulse tube/JT冷凍機の開発

Development of a Pulse tube/JT cryocooler for calibration apparatus for resistance thermometers

島崎 毅, 豊田 恵嗣, 田村 収(産総研 計測標準研究部門)
 SHIMAZAKI Takeshi, TOYODA Keishi, TAMURA Osamu
 National Metrology Institute of Japan, AIST
 Tsukuba Central 3, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8563, Japan
 E-mail: t.shimazaki@aist.go.jp

1. はじめに

我々は、機械式冷凍機と ^3He のジュール・トムソン膨張を用いた、極低温温度計校正用の比較校正装置の開発を行っている。校正温度の下限は、1990年国際温度目盛(International Temperature Scale of 1990, ITS-90)の定義下限温度である0.65 Kを目指している。これまで、そのプロトタイプ冷却装置として、小型の6 K GM冷凍機を使用したGM/JT冷凍機を製作し、冷却システムの基本構成について検証を行ってきた [1-3]。今回、実際に比較校正装置に使用する冷却装置として、4 Kパルス管冷凍機と ^3He のジュール・トムソン膨張を用いたPulse tube/JT冷凍機を製作した。

2. 冷凍機

温度計の比較校正を行う際には、あらかじめヘリウム蒸気圧温度計などにより目盛付けされた、標準用カプセル型ロジウム鉄抵抗温度計を基準温度計として使用する。この温度計の感温部であるロジウム鉄合金の細線コイルは、応力がかからないよう、緩やかに保持された状態で温度計ケース内に挿入されている。そのため、温度計としてきわめて安定した特性が得られる一方で、機械的な振動に非常に弱く、機械的ショックなどにより細線に応力がかかると、抵抗値が不可逆的に変わってしまい目盛がずれてしまう。そこで、機械式冷凍機に起因する振動を低減するため、JT冷却回路の予冷段としてパルス管冷凍機(第一段冷却能力: 10 W at 45 K、第二段冷却能力: 0.5 W at 4.2 K)を使用した。Fig. 1にその模式図を示す。

JT回路ガスハンドリングシステム(GHS)は、 ^3He 循環用排気ポンプ、圧縮機、液体窒素トラップなどで構成される。 ^3He ポット排気管は、自動バタフライ弁を備え、また除振や熱流抑制等のためのベローズ部を持つ。

3. 試運転結果

自動バタフライ弁によって排気速度を制御し、 ^3He ポットを0.5 Kから1.6 Kまでステップ状に変化させた結果をFig. 2に示す。各ステップにおける温度安定度は、0.5 mK~1 mK以内であった。温度計の比較校正を行う際には、第二ラディエーションシールド内に比較校正用銅ブロックを懸架し、 ^3He ポットと適当な熱リンクで接続することで、さらに温度を安定させることになる。連続運転時の ^3He ポットでの最低到達温度は0.45 Kであった。また、 ^3He ポットにおける冷却能力は、設定条件によるが、その一例をFig. 3に示す。

参考文献

- 1) T. Shimazaki, et al., Abstracts of CSJ Conference74 (2006) 95
- 2) T. Shimazaki, et al., Rev. Sci. Instrum. (2006) 77 034902-1
- 3) T. Shimazaki, et al., Int. J. Thermophys. (2008) 29 42-50

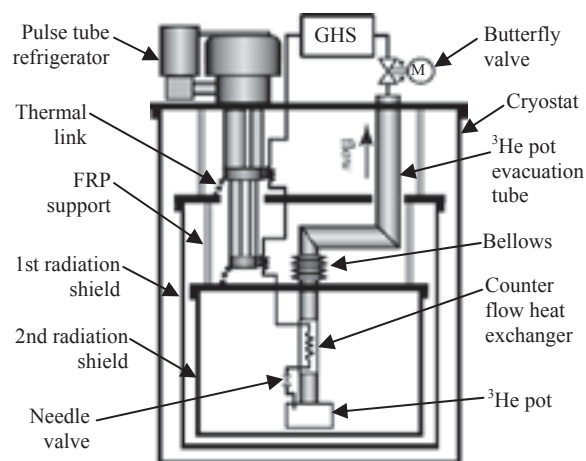
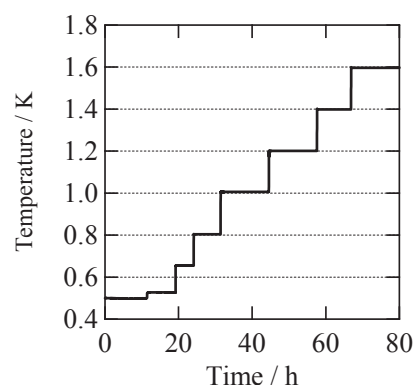
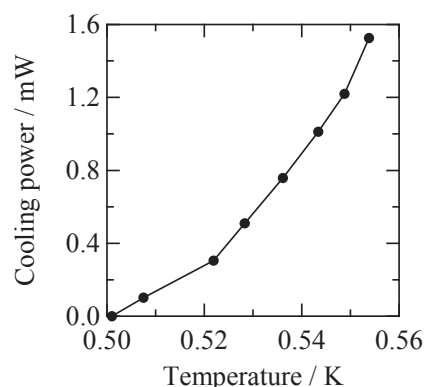


Fig. 1 Schematic of the refrigerator.

Fig. 2 ^3He pot temperature controlled by the evacuation speedFig. 3 Cooling power at the ^3He pot

LHD 型核融合発電炉による水素燃料の製造・輸送の研究

Study on hydrogen production and transportation from steam electrolysis in LHD-type Fusion Reactor

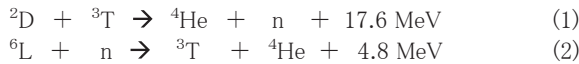
山田修一, 相良明男, 今川信作, 本島 修 (NIFS)
 YAMADA Shuichi, SAGARA Akio, IMAGAWA Shinsaku, MOTOJIMA Osamu (NIFS)
 E-mail: yamadas@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

ヘリカル型核融合実験装置では、プラズマ電流が不要、電流駆動型のプラズマディスラプションの心配が軽減、などの特徴を有するので、定常核融合炉として有望である。LHDの閉じ込め性能並びに装置技術の経験を基に、LHD型核融合発電炉 (FFHR) の概念設計が行われている [1]。FFHRの熱出力及び電気出力はそれぞれ3GWと1GWになるように装置は最適化されている。電気出力と水素燃料製造を併用するパワープラントは、①熱出力の変動を吸収、②昼夜の需要変動の平準化、③将来の燃料電池社会のニーズへの対応、等の観点から有効と考えられる。ここでは、発電と水素製造を併用する核融合発電炉をとりあげ、出力のバリエーション、水素エネルギー変換効率、水素製造のシナジー効果、等について検討を行う。

2. 核融合炉と水素製造

発電と水素製造併用の核融合炉を Fig. 1 に模式的に示す。炉心からの中性子はブリーダブランケットでエネルギー変換されて、冷却ループに熱を伝える。また、ブリーダブランケットでは、リチウムと中性子の反応によって核融合燃料である三重水素を製造する。炉心からのヘリウム灰は、磁力線に沿ってダイバータ部へ流出して排気される。代表的な反応は、



で表される。FFHR では、ダイバータ部への熱移動は約 450 MW と計算される。本システムでは、この廃熱で水蒸気を作り、高温水蒸気電気分解により水素を製造する。ここで、1 GWの発電出力を全て高温水蒸気電気分解に適用すると、706 トン/日の水素が製造される。電解に必要な水蒸気は 6354 トン/日であり、この水蒸気の製造に必要な熱量は Table 1 に示すように、ダイバータ部の廃熱で吸収できる。

3. 運転形態とエネルギー変換効率

電気分解によって得られた水素ガスは密度が低いので、ユーザへの輸送を考慮すると、水素は圧縮ガスもしくは液化によってエネルギー密度を高くする必要がある。発電出力から水素製造までのパワーフローを Fig. 2 にまとめる。圧縮工程では、0.1 MPa から 50 MPa 迄の圧縮を仮定し、その動力の評価に際しては等温圧縮と断熱圧縮の平均値を用いた。また、液化に対しては、WE-NET [2]での 30 トン/日の水素液化機の動力を用いて外挿した。電気出力から水素燃料へのエネルギー変換効率は、

$$\eta = \frac{E_{H_2}}{E_{WS} + E_{PACK}} \times 100 \quad (3)$$

で評価する。ここで、 E_{H_2} は水素の有する燃焼熱エネルギー、 E_{WS} は電気分解に費やした電気エネルギー、 E_{PACK} は圧縮工程または液化工程で消費するエネルギーである。

Table 1 Heating power to produce steam of 6354 tons/day.

Stem temperature: °C	150	200	250	300	350
Heat input: MW	198	206	213	221	229

4. 考察とまとめ

電気分解に必要なエネルギーは、電気分解前後のガスのエンタルピー差と外部から入力する電気エネルギーとの和で与えられる [3]。ここでは、廃熱 221 MW を高温水蒸気の製造に利用しているので、高効率の水素製造が実現している。

一方、700 トンの水素中には、核融合炉の燃料である重水素が約 100 kg 程度含まれている。また、水蒸気の製造過程で、海水の濃縮・蒸発は、ブランケット及び増殖材の材料である Li 資源の高効率分離に対して期待できる。廃熱が有効利用できる水素製造は、定常核融合発電炉にとって有効な運転形態のひとつであることが確認できた。

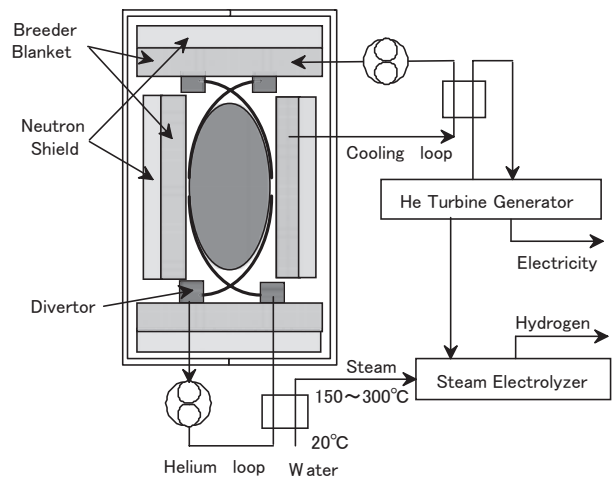


Fig. 1 Schematic illustration of co-generation of electricity and hydrogen.

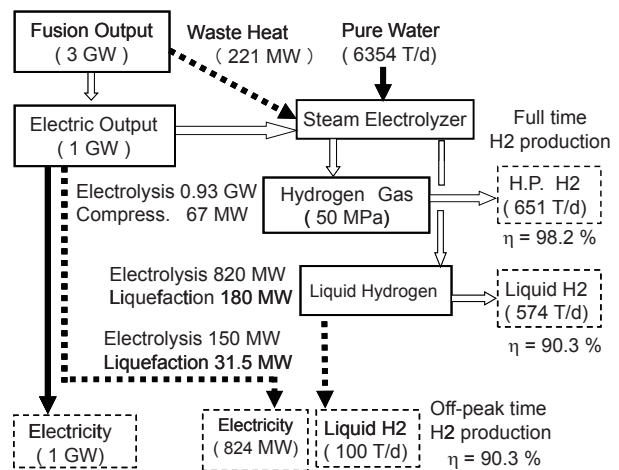


Fig. 2 Power flow diagram and efficiencies of H₂ productions.

参考文献

1. A. Sagara et al: Nuclear Fusion 45 (2005) 258-263.
2. WE-NET Report 2001; <http://www.ena.or.jp/WE-NWT/>
3. 岡野, 他: プラズマ核融合学会誌, 第 77 巻 6 号 (2001) pp.601-608.

蓄冷材開発に向けたペロブスカイト酸化物試料の比熱測定 (2)

Specific heat measurement of perovskite oxide samples for development of regenerator

— Consideration about effect of substitution —

松原 隆博, 池田 博 (筑波大)

MATSUBARA Takahiro, IKEDA Hiroshi (University of Tsukuba)

E-mail: s0720683@ipe.tsukuba.ac.jp

1. はじめに

GM 冷凍機等の小型冷凍機では冷凍能力の要の一つとして蓄冷材が挙げられる。我々は作成が容易で、よく知られている ABO_3 (A: 希土類元素, B: 金属元素) のペロブスカイト型酸化物に注目し、蓄冷材の開発を目指してきた¹⁾。前回我々は系統的に希土類、金属元素を変化させ試料作製を行い、磁化測定と比熱測定を行った。B サイト金属元素により磁化と比熱の性質は大きく異なり、A サイトの元素による影響として 5K 付近で Gd, Tb, Ho の比熱が大きくなることを報告した²⁾。

今回も新たに A 及び B 元素を系統的に換えた試料を作成し、試料評価として比熱測定と磁化率測定を行い、比熱の振る舞いを Pb と比較して比較検討を行ったので報告する。

2. 試料作製

今回作成した試料は A を Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er と固定し、B を Fe, Ni, Cr, V と換えて作成を試みた。高純度(99.99%以上)の原料粉を秤量し、乳鉢で攪拌した。この試料を電気炉で仮焼きし、さらに乳鉢で攪拌した。原料粉を 20mm φ の成型器で圧をかけ円柱状のペレットにした。このペレットをアルミナの燃焼ボートにのせ、管状電気炉で 1250 から 1500°C 範囲の空気雰囲気中で焼成した。

3. 試料評価

焼成したペレット状の試料は、ダイヤモンドカッターを用いてそれぞれ 100mg, 5mg 程度に加工した。磁化測定に関しては Quantum Design 社製 SQUID 磁束計の MPMS で室温(280K)から 5K までを行い、比熱測定に関しては Quantum Design の PPMS で 200K から 5K まで 1K 間隔で行った。

4. 結果と考察

5K から 50K までの $DyNiO_3$, $ErNiO_3$, $GdNiO_3$, $HoNiO_3$, 及び $TbNiO_3$ の磁化測定の結果を Fig.1 に示す。8K 付近において $TbNiO_3$ が僅かに段差があることが見て取れる他は、どれも低温になるに従い磁化の値が増大している事がわかる。この Ni の系は、前回発表したようにキュリー則に大体従っていると思われる。

また、5K から 50K までの $DyNiO_3$, $ErNiO_3$, $GdNiO_3$, $HoNiO_3$, 及び $TbNiO_3$ の比熱測定の結果を体積あたりで Pb と Cu と比較したものを Fig.2 に示す。 $TbNiO_3$ が 8K 付近で比熱の大きなピークが観測された。この温度は $TbNiO_3$ が磁化測定で段差が見られた温度に一致する。他の試料に関しては、 $HoNiO_3$ が 20K 付近からゆるい比熱の増大が見られ、 $GdNiO_3$ が低温で比熱が上昇している。これに関しても前回見出した系統性に従っている。

今までは ABO_3 の構造に限定して試料作製を行ってきたが、今回は、 ABO_4 の構造をとることが知られている、Cr, V での置換を行った。これらの実験結果については当日発表する。

5. まとめ

今回は希土類、金属元素を系統的に変化させ試料作製を行い、磁化測定と比熱測定を行った。 ABO_3 の構造の、Ni, Fe に関しては前回確認したものと同様の系統性が見出された。また、今回は ABO_4 の構造をとる元素置換も行った。

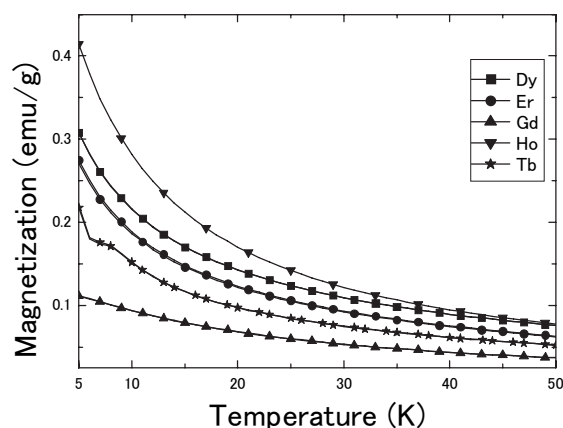


Fig.1 Magnetization of $ANiO_3$ (A=Dy, Er, Gd, Ho, Tb) from 5K to 50K

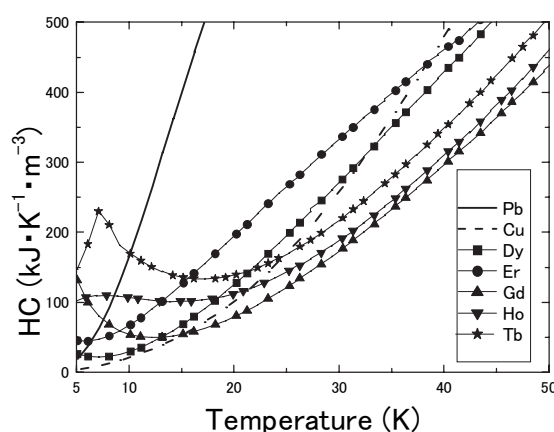


Fig.2 Heat Capacity of $ANiO_3$ (A= Dy, Er, Gd, Ho, Tb) compared with Pb and Cu from 5K to 50K

参考文献

- 1) H. Ikeda, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.116
- 2) T. Matsubara, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2000) p.265

室温磁気冷凍機の COP 向上の可能性

Prospect of COP Improvement of Room temperature Magnetic Refrigerator

才丸 満, 岡村 哲至 (東工大); 平野 直樹, 長屋 重夫 (中部電力)

SAIMARU Mitsuru, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech.); HIRANO Naoki, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co.)

E-mail: saimaru.m.aa@m.titech.ac.jp

1. はじめに

磁気冷凍は、磁性材(磁気作業物質)に磁束密度変化を与えることによって温度変化を生じる磁気熱量効果を利用し、冷凍サイクルを構成することにより冷却を行なう。

本報告では、磁気作業物質であるGdのブレイトンサイクルによるT-s線図から算出した理論に基づくCOPと、所要動力としてモータの動力に加え、水動力または実測によるポンプ動力を各々含めて算出した実験に基づくCOPの比較・検討を行い、COP向上の可能性について述べる。

2. 実験装置

本研究で試作した磁気冷凍機システムの概略図を図1に示す。一對の永久磁石を、磁気作業物質が充填された4本のダクト(AMR bed)が囲み、磁場の印加されたダクトでは排熱部へ向かって熱交換媒体である水が流れ、磁場の印加されていないダクトでは冷却部へ向かって水が流れる。モータによって磁石が90°ごとに回転し(1Tの磁束密度変化が生じ)、それと同期してロータリー弁が回転することにより水の流れる向きを変えている。排熱側の温度調節器により高温端の水温を制御し、各ダクトの両端での水の温度は銅-コンスタンタン熱電対を用いて計測している。実験におけるパラメータは、高温端温度、磁石の停止時間とする。永久磁石が360°回転する時間を1サイクル時間とする。ヒーターにより冷却ステージに熱入力し、低温端温度が定常になったときのヒーターからの入熱量を、その温度での冷凍能力(Cooling Power)とする。

電力の低減にはポンプ効率の改善に加えて、磁石回転トルク低減によるモータの動力の低減が、有効と考えられる。

本研究は、地球温暖化防止新技術プログラムの一環である「ノンフロン型省エネ冷凍空調システム開発」として、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託により実施したものである。

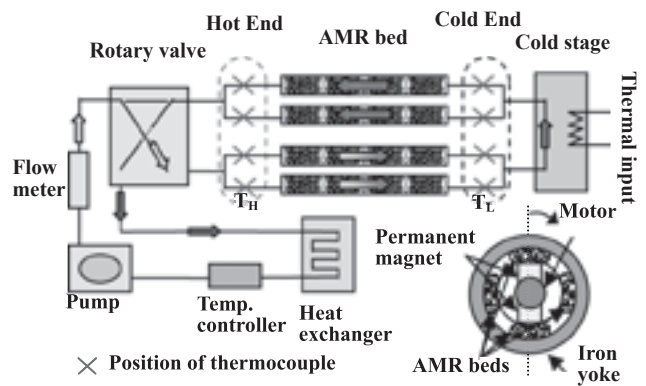


Fig.1. Configuration of the room temperature magnetic refrigerator

3. COP

図2にGdの1Tと0Tの間の磁気熱量効果におけるブレイトンサイクルによるT-s線図から算出したCOP_(a)と、さらにGdと水の熱交換(つまり1サイクルあたりのGdと水の熱容量比から算出したGdから水に移る冷熱量)を考慮して算出したCOP_(a')、所要動力としてモータの動力、制御盤の電力に加え、水動力(すなわちポンプ効率を100%としたときのポンプ消費電力)を含めて算出したCOP_(b)、実測によるポンプの消費電力を含めて算出したCOP_(c)の比較を示す。ここで、各々のCOPは高温端温度T_H=24°C、低温端温度T_L=19°Cに保ったときの値である。

T-s線図から算出したGdの持つ冷熱量は1350Wであり、COP_(a)の値は38.5となるが、Gdと水の熱容量比により、Gdから水に移る冷熱量は670Wとなり、COP_(a')の値は18.2となる。

一方、実験から得られた最も高いCOP_(c)の値は2.5である。このときの冷凍能力は、流量6.4 L/min・サイクル時間6.8 secにおいて199Wであり、実測によるポンプの消費電力が45W(ポンプ効率にして10.2%)、モータの動力が23W、制御盤の電力が10Wである。流量6.4 L/min・サイクル時間6.8 secにおいて、ポンプ効率を100%として算出されるCOP_(b)の値は5.3を示し、流量6.4 L/min程度の低流量下でのポンプ効率の低さがCOPに強く影響を与えている。

4. COP 向上の可能性

COP向上には冷凍能力の向上、若しくは消費電力の低減が課題となる。冷凍能力の向上には磁石回転時間の高周波数化(つまり単位時間あたりの冷熱発生回数の増加)が、消費

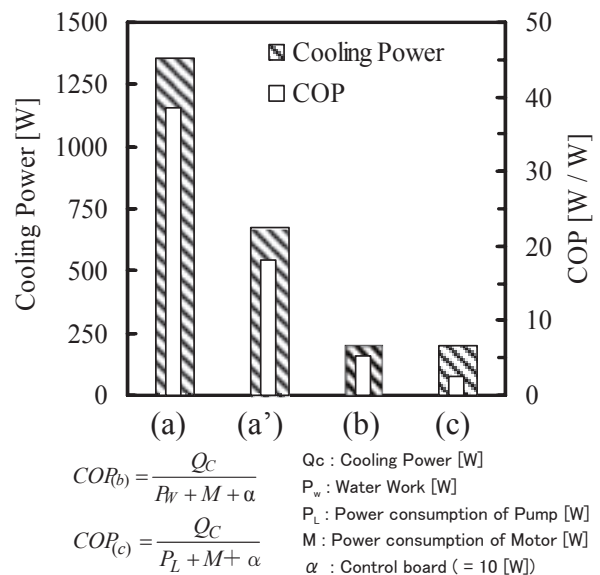


Fig.2 Comparison between theoretically-obtained COP and experimentally-obtained COP.

COP calculated based on (a) T-s diagram and (a') T-s diagram taking into account of the heat exchange between Gd and water (b) water work power and (c) actual power consumption of pump, respectively.

$$COP_{(b)} = \frac{Q_c}{P_w + M + \alpha}$$

$$COP_{(c)} = \frac{Q_c}{P_L + M + \alpha}$$

Q_c : Cooling Power [W]
 P_w : Water Work [W]
 P_L : Power consumption of Pump [W]
 M : Power consumption of Motor [W]
 α : Control board (= 10 [W])

AMR磁気冷凍機の開発 — 実験結果とサイクルについて —

Development of AMR – Experimental results on cycle operation –

吉岡 尚吾 (NIMS,千葉大);近藤 卓矢, 松本 宏一 (金沢大);神谷 宏治, 沼澤 健則 (NIMS)

YOSHIOKA Shogo (NIMS, Chiba University); KONDO Takuya; MATSUMOTO Koichi (Kanazawa University); KAMIYA Koji, NUMAZAWA Takenori (NIMS)

Email 07tm0350@graduate.chiba-u.jp

1. はじめに

物質・材料研究機構と金沢大学では、水素液化用磁気冷凍機の開発を進めている。これまでに、駆動型磁気冷凍方式による水素の液化を実証するとともに、磁性体の充填密度や形状に対する液化特性の変化について調べてきた。[1][2]

次の段階として、水素ガスを予冷するために、77K から水素液化温度約 20K までの、能動的蓄冷型磁気冷凍機 AMR(Active Magnetic Regenerator)の開発に取り組んでいる。[3]

講演では、試作した実験装置の構造、および実験結果の報告を行い、改善点に関して議論する。

2. 実験方法

本実験では広い冷凍温度幅を期待できる AMR サイクルを使用する。Fig.1 は実験装置の全体写真である。精度向上のために、駆動機構を空圧式シリンダーから電動式シリンダーに変更した。また、信頼性向上のため、改良型のウィルソンシールを採用した。磁場の発生には、最大 6T の伝導冷却型超伝導磁石を使用した。

AMR サイクルは、磁場変化による磁性体の磁気熱量効果と、磁性体ホルダー中を移動する熱交換流体による熱輸送によりサイクルを形成する。これを Fig.2 に示す。磁場変化と熱交換流体の位相は、独立かつ同期した制御が必要となる。すなわち、磁場変化を発生するための磁性体の駆動と熱交換流体との駆動は、別々の制御が必要である。しかしながら、本実験装置では磁場空間が直径 10cm しかないため、断熱空間に2つの駆動機構を設置することが困難であった。そこで、封じこめたガス中で磁性体ホルダーを駆動することにより、磁場変化と熱交換を同時に行う、大幅に簡略化されたサイクルを採用している。

本実験では、2種類の磁性体について冷凍特性を調べた。水素液化用に開発された、Dy-Gd-Al ガーネットセラミックス磁性体(DGAG)、および東北大学で開発された一次転移材料 Fe-La 系磁性体である。前者は直径約 0.4mm の球状、後者は粉碎されたものをフィルターによって 0.5mm 程度にふるいをかけた形状である。

3. 実験結果とまとめ

本実験装置ではAMRサイクルそのものの駆動が困難であることは明らかで、むしろ、磁性体中に形成される温度勾配や各部の冷凍サイクルの解明に焦点が当てられている。DGAG磁性体の場合には、30K以下で自立的に温度勾配が形成され、断熱消磁温度幅を上回る温度勾配が安定して得られた。一方、Fe-La系磁性体では断熱消磁温度幅と同程度の温度勾配しか得られなかった。これは実験装置の制約(磁場分布等)から来るものと考えられるが、一次転移材料のもつ特性に依存する部分もあり、解明が今後の課題である。

謝辞

本研究は新エネルギー・産業技術開発機構(NEDO)からの委託により、水素安全利用革新技術プロジェクトの一環として、

財団法人エネルギー総合工学研究所との共同研究により実施されている。

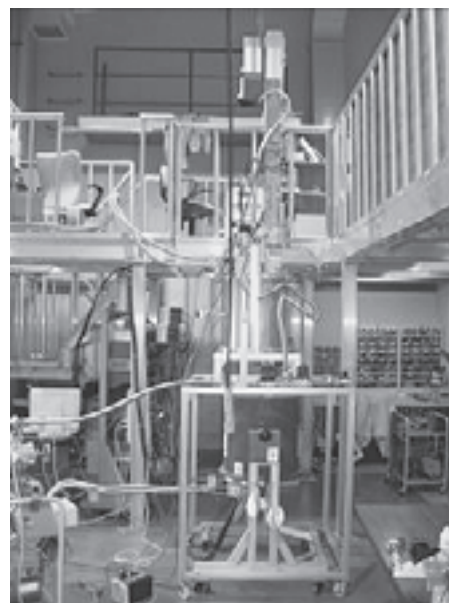


Fig.1 AMR test apparatus

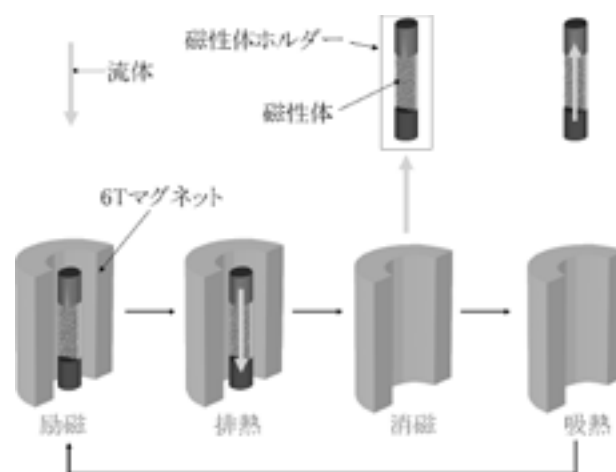


Fig.2 AMR operation cycle

参考文献

- [1] 吉岡尚吾他、第75回秋季低温工学・超伝導学会講演概要集、pp 292 (2006)
- [2] 吉岡尚吾他、第76回春季低温工学・超伝導学会講演概要集、pp 138 (2007)
- [3] 松本宏一他、第77回秋季低温工学・超伝導学会講演概要集、pp 141 (2007)

水素用磁気冷凍

—AMRサイクルにおける二次転移材料の転移温度制御—

Magnetic refrigeration for hydrogen liquefaction
 -Transition temperature of second order transition material and AMR cycle-

近藤 卓矢, 池田 正和, 祖父江 雅充, 松本 宏一 (金沢大); 神谷 宏治, 沼澤 健則 (NIMS)
 KONDO Takuya, IKEDA Masakazu, SOBUE Masamitsu, MATSUMOTO Koichi (Kanazawa-U); KAMIYA
 Koji, NUMAZAWA Takenori (NIIMS)
 E-mail:kon.d-28@stu.kanazawa-u.ac.jp

1. はじめに

我々は常温やLNG,液体窒素を排熱温度とする水素液化用磁気冷凍機の開発を行っている。

前回までに、水素液化温度 (20K) から液体窒素温度 (77K) までの温度範囲で磁気相転移を持つ磁性体の研究を行い、その磁気熱量効果 (Magnetocaloric Effect:MCE) について、一次や二次の磁気転移を持つ物質について調べ、その磁化や、エントロピーを報告してきた。そして、蓄冷型熱サイクルの解析や試験装置による20-30K領域でのAMRサイクルの実証などについて報告してきた。

今回は、冷凍サイクルの最適化の問題について、磁性材料の転移温度制御という観点から研究を行った。解析に用いるエントロピーは、任意の温度で転移点制御された磁性体の実験データを用いることが好ましいが、時間・コストの面で困難である。そこで、磁性体のエントロピーを理論的に算出し、ブレイトン型AMRサイクルにおいて、物質の転移点制御や転移点の異なる物質の多層化についての解析を行った。この結果により、磁性材料の最適化に対するいくつかの指針を得たので報告する。

2. エントロピー線図の計算

本研究の温度領域では磁性体のエントロピーは格子系と磁気系のみを考えればよい。磁気的性質は二次相転移を仮定し分子場近似により磁気エントロピーを求めた。格子系はデバイ近似による格子比熱から格子エントロピーを計算した。これらを合わせて、任意の転移温度を持つ磁性材料のエントロピーを評価した。

本研究で我々の考えている磁気作業物質は、 RT_2 (R は希土類元素、 T はNi, Al など)を考えた。この系では、磁気相転移温度 T_c は希土類元素の de Gannes 因子 $((g-1)^2 J(J+1))$ に比例する事が知られている。また、 RT_2 の T に用いる Al や Ni の組成を変化させる事でも磁気相転移温度の制御が可能である。今回は、磁性元素は $R=Dy$ を用い T およびその組成比で転移温度を変化させることを考えた。

Fig.1にいくつかの転移温度の場合についてエントロピー変化 dS を示す。

3. シミュレーション概要

今回、理論計算で求めたエントロピーを用いたことにより、任意に磁性体を多層化したAMRでの計算が可能になった。単層・2層・3層…と磁性体層数やそれぞれの層の割合を変えながら計算を行なった。

単層AMRにおいて実験から求めた $DyAl_2$ エントロピーと $T_c=60K$ の理論から求めたエントロピーを用いた冷凍出力の計算結果をFig.2に示す。両者は定量的にはほぼ一致している。解析結果の詳細に関しては、本講演にて発表する。

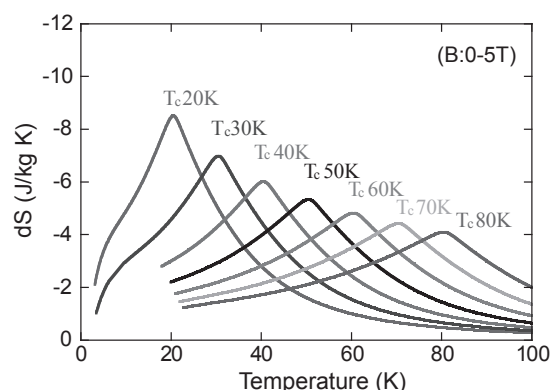


Fig1:2次転移する磁性体のエントロピー変化(B:0-5T)

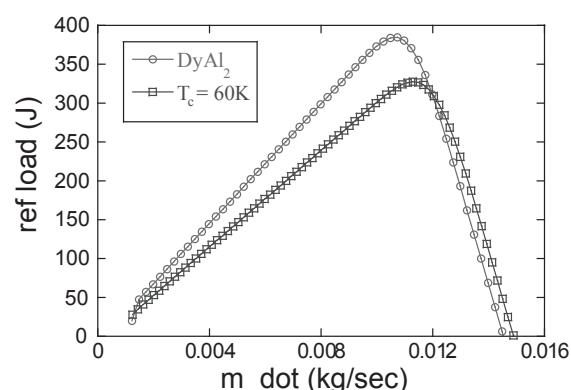


Fig2:DyAl₂とT_c=60Kの冷凍出力比較
 m_{dot}:熱交換ガスの流量

謝辞

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) からの委託により、水素安全利用基盤技術開発プロジェクトの一環として、財団法人エネルギー総合工学研究所との共同研究により実施されている。

宇宙用連続型断熱消磁冷凍機の開発 (1)開発経過と総括 Continuous ADR System for Space Application (1) Developing history and summary

沼澤 健則、神谷 宏治 (物質・材料研究機構) ; 高橋 健太 (物質・材料研究機構, 千葉大学) ; Peter Shirron (NASA/GSFC); 満田和久 (ISAS/JAXA)

NUMAZAWA Takenori, KAMIYA Koji (NIMS); TAKAHASHI Kenta (NIMS, Chiba University); Peter Shirron (NASA/GSFC); MITSUDA Kazuhisa (ISAS/JAXA)

E-mail: Numazawa.takenori@nims.go.jp

1. はじめに

宇宙環境を利用した基礎科学分野、特にX線天文学や基礎物理学において、極低温や超低温環境はミッションの成否に不可欠な技術要素として広く認識されている。高エネルギーX線検出の分解能を飛躍的に高めるX線マイクロカロリメータは、新たな宇宙像を捉える画期的検出技術として活躍が期待されており、科学衛星計画が JAXA, NASA, ESA において、次々と検討されている。このようなカロリメータの作動には、100mK 以下の超低温環境が不可欠である。さらに、宇宙環境利用分野では、国際宇宙ステーション日本モジュールを利用した量子固体・液体に関する極低温宇宙実験が提案されており、ADR の採用が検討されている。

本研究は、このような宇宙における汎用な極低温・超低温環境を提供する連続型断熱消磁冷凍機(ADR)の開発を目的としたもので、2005年度から2007年度まで日本宇宙フォーラムの宇宙環境利用に関する公募地上研究によって実施された。本稿では開発経過を概観し、研究の総括と今後の展望を述べる。ADR の地上及び航空機による実験結果は、これに続く講演で詳細に報告する。

2. 研究の概要

ADR装置そのものはすでに半世紀以上の使用実績があり、商用機も市販されている。しかし、これらは全て間欠的(一時的)に低温環境を発生するものであり、冷凍機として連続した低温維持が可能なADRは、NASAのPeter Shirronが開発するまでは存在しなかった。連続型ADRは2つのADRユニット(磁性体+マグネット+熱スイッチ)を基本とし、カルノーサイクルの移相をずらして駆動することにより、定常的に低温を発生することができる。Fig. 1には、4つのADRユニットから構成される連続型ADRの構成概念図を示した。本ADRの設計値は、発生温度100mK、冷凍能力0.1mW(目標値)、排熱温度4Kである。

本ADRでは、GM冷凍機と結合することによって無冷媒化を達成するとともに、航空機による微小重力実験の実施をふまへ、小型・軽量化をはかっている。さらに2種類の実験(センサー冷却とヘリウム観察)に対応させるため、温度安定度をやや犠牲にし、より高い冷凍能力に重点を置いている。Fig. 2には、完成したクライオスタットの外観図と構造図を示した。

ADRは2007年10月頃に完成し、地上での冷凍試験を繰り返した。当初は熱侵入等の問題により連続作動の安定性に困難があったが、現状では100mK~140mKの連続発生を問題なく達成している。本ADRを微小重力環境下で試験するために、2007年12月および2008年3月に航空機によるパラボリック飛行実験を実施した。航空機実験では、離陸時や微小重力発生前に生ずる2Gから0Gまでの急激なG変化のため、連続作動そのものは達成できなかった。しかし、巡航時の航空機内で150mKを発生し、かつ微小重力環境下においては、作動特性がむしろ安定化することが確認できた。

3. 総括と展望

実質2年程度の短期間で連続型ADRを駆動できるようになったことは、NASA/Goddardの全面協力によるところが大きい。本プロジェクトはあくまでも宇宙実験へのステップであり、現在、

宇宙ステーション「きぼう」への搭載を目指して、新しい設計に取り組んでいる。以下に、総括と課題を示す。

- (1) 地上における連続型ADRは、ほぼ所定の仕様を満足した。発生温度の安定化と100mK以下の発生が課題。
- (2) 微小重力下での作動そのものには、困難がなかった。
- (3) 航空機実験では連続作動を達成できなかった。しかし、これは宇宙用冷凍機では想定されていない、航空機特有の環境によるものであり、除振装置の開発が必須である。
- (4) クライオスタットやGMコールドヘッドを含むADRシステムの質量は60Kg以下、100Vで作動可能であるとともに、消費電力は1.5~2.0kWで、小型・軽量化が達成された。
- (5) 窓付きクライオスタットを使用しても、大幅な冷凍能力の低下は見られなかった。
- (6) GM冷凍機(SHI SRDK-101D)は、20秒程度の微小重力を1フライトあたり10回以上繰り返す条件下でも、問題なく作動した。

謝辞

本研究は(財)日本宇宙フォーラム宇宙環境利用公募地上研究(次期宇宙利用研究)により、実施された。

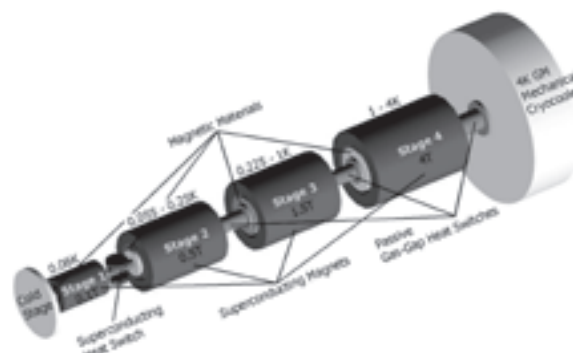


Fig.1 Schematic of 4 stage continuous ADR

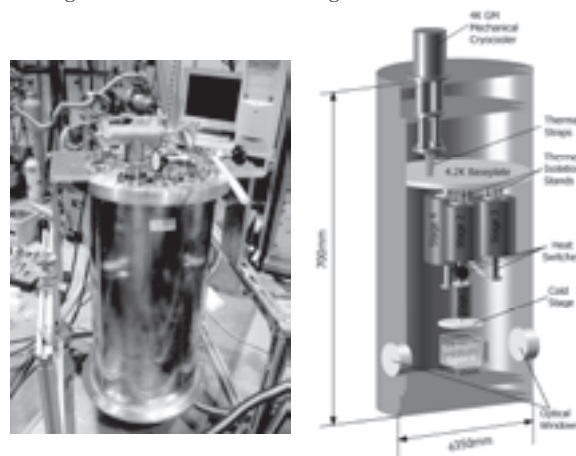


Fig.2 Flight model of the continuous ADR

宇宙用連続型断熱消磁冷凍機の開発 (2)地上冷凍機試験 Continuous ADR System for Space Application (2) Ground Experiments

高橋 健太(物質・材料研究機構, 千葉大学); 神谷 宏治, 沼澤 健則(物質・材料研究機構); Peter Shirron (NASA/GSFC); 石崎 欣尚, 赤松 弘規(首都大学東京); 藤本 龍一, 児嶋 佑介(金沢大学); 篠崎 慶亮 (ISAS/JAXA)
TAKAHASHI Kenta (NIMS, Chiba University); KAMIYA Koji, NUMAZAWA Takenori (NIMS); Peter Shirron (NASA/GSFC); ISHISAKI Yoshitaka, AKAMATSU Hiroki (Tokyo Metropolitan University); FUJIMOTO Ryuichi, KOJIMA Yusuke (Kanazawa University); SHINOZAKI Keisuke (ISAS/JAXA)
E-mail: takahashi.kenta@nims.go.jp

1. はじめに

宇宙利用にむけた超低温生成システムとして、その作動が重力の有無に依存しない連続型断熱消磁冷凍機 (CADR: Continuous Adiabatic Demagnetization Refrigerator) の開発を進めている[1][2]。宇宙における超低温冷凍機は、天文学の分野では X 線、赤外線検出センサーの冷却、基礎物理学の分野では固体ヘリウムの生成・維持において重要な要素であり、今後の宇宙環境を利用した科学技術の進展のために必要不可欠であるといえる。

今回我々は、航空機を用いた微小重力実験の予備試験として地上での CADR 冷凍試験を行った。また、TES 型 X 線マイクロカロリメータ(首都大製作)を CADR に搭載し、信号取得試験を行った。

2. CADR の構成

CADR は冷却ステージが励磁過程のときに隣接するステージが消磁過程となることで、励磁による冷凍の間欠性を排除できることを特徴としている。開発中の CADR は4段のステージ(磁性体+マグネット)により構成されている(Fig.1)。各ステージは熱スイッチによって直列に接続されており、熱スイッチの ON/OFF によって各ステージ間の熱流が制御される。第 1 ステージ-第 2 ステージ間の熱スイッチには超伝導ヒートスイッチを用いた。また、その他のステージ間には自己吸着型ガス伝導ヒートスイッチ (PGGHS=Passive gas-gap heat switch) を採用した。PGGHS は低温端の温度によりスイッチの ON/OFF が制御されるため、アクティブ型ヒートスイッチとは異なり外部からの制御が不要である。磁性体には第 1 ステージから第 3 ステージまでは CPA(クロムカリウムミョウバン)を用い、第 4 ステージには従来の GGG(ガドリニウム・ガリウム・ガーネット)から GLF($GdLiF_4$)にかえることで冷凍能力の増大をはかった。

3. 冷凍試験

冷却ステージ(第 1 ステージ)の温度を 120mK に設定して冷凍サイクルを動かした。各ステージの温度と電流を Fig.2 に示す。サイクルを通して、冷却ステージは $580 \mu K$ rms の安定度で連続的に 120mK を維持することができた。

さらに、冷却ステージに TES 型 X 線マイクロカロリメータを取り付け、120mK 温度で信号取得実験を行なった。その結果、CADR の連続運転においては初めてパルスを取得することに成功し、44.5eV という分解能を得ることができた。TES 型 X 線マイクロカロリメータは 100mK 以下の温度で優れた分解能を得ることができるため、今後はより低い温度における連続冷凍の達成が課題となる。

謝辞

本研究は(財)日本宇宙フォーラム宇宙環境利用公募地上研究(次期宇宙利用研究)により、実施されている。

参考文献

[1] K.Takahashi, et al. :Abstracts of CSJ Conference, Vol.76 (2007) p139

[2] K.Takahashi, et al. :Abstracts of CSJ Conference, Vol.77 (2007) p140

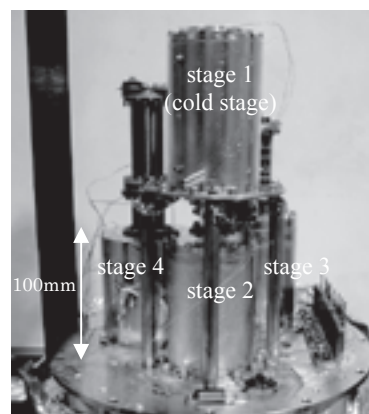


Fig.1 Picture of a CADR

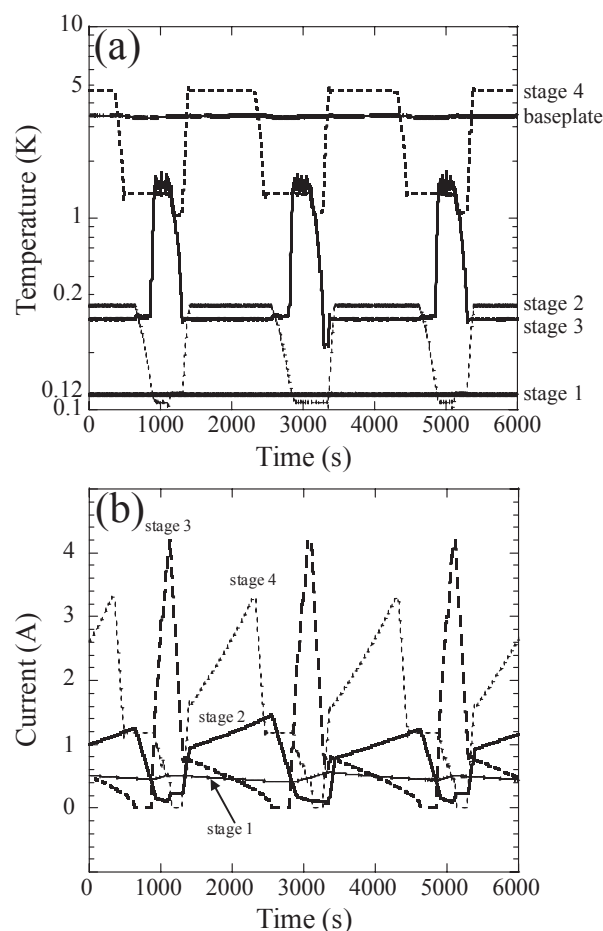


Fig.2 (a) Temperature profiles of all four stages and the base plate in the CADR cycle, and (b) change in current for each corresponding stage.

宇宙用連続型断熱消磁冷凍機の開発 (3) 航空機実験および今後の展望 Continuous ADR system for Space Application (3) Flight Experiments and Future Perspectives

神谷 宏治, 高橋 健太, 沼澤 健則(NIMS); Shirron Peter(NASA/GSFC); 満田 和久(ISAS/JAXA); 奥田 雄一(東工大)
KAMIYA Koji, TAKAHASHI Kenta, NUMAZAWA Takenori(NIMS); SHIRRON Peter(NASA/GSFC);
MITSUDA KAZUHISA(ISAS/JAXA); OKUDA Yuichi(Tokyo Institute of Technology)
E-mail: kamiya.koji@nims.go.jp

1. はじめに

NIMS では宇宙用連続型断熱消磁冷凍機(CADR)の開発を進めている[1][2]。CADR は地上実験において、無負荷状態で120mKの連続定常運転に成功し、その後TES型X線マイクロカロリメーター搭載状態でも、120mKの連続運転に成功し、X線パルスを検出した。CADRは冷却性能が重力に非依存という特徴をもつため、本研究ではこれら地上実験に続き、航空機による微小重力環境での実証試験を試みた。航空機実験は2007年12月と2008年3月の2度実施され、1度目の12月の実験において、航空機実験では無重力状態よりむしろ振動による発熱やステージ間の熱短絡といった問題が本質的であることがわかってきた。2度目の3月の実験は1度目の結果を受け、除振台を設置し、測定結果を1度目の航空機実験と比較した。結論から言うと、除振台は効果的であったが、さらなる改良を要するといえる。本研究の目的の一つは、これらの知見をもとに、さらなる耐振動性を向上させ、航空機微小重力実験のフライト全行程において、CADRが安定した冷却性能を発揮できるようにすることである。また、将来的にCADRは国際宇宙ステーション暴露部での固体ヘリウム実験用冷凍機として有力視されているため、本冷凍機を用いた液体ヘリウム冷却の予備実験も同時に進めている。本講演では、100mK固体ヘリウムを生成するため、CADRに要求される冷凍性能を試算し、具体的方法に言及する。

2. 航空機実験

微小重力実験にはダイヤモンドエアサービス社のMU-300を使用し、パラボリックフライトにより約30秒間の微小重力環境が継続する。前述のように微小重力は問題ではないが、航空機が発生する振動がCADRのサイクルを阻害することがわかった。解析の結果、低周波(数Hz)と高周波(数kHz)、2つの振動領域が大きな影響を与えており、低周波は主に飛行機のTaxingや離陸、そして乱気流による機体のゆれなどであり、高周波はジェットエンジンからの断続的な振動に起因している。低周波数は、CADRのステージ間の熱短絡を誘発し、高周波は断続的に第2ステージを発熱させる。これ以外にも微小重力状態前後で1.3~2Gの加速度が生まれ、重力急変による低周波振動をCADRに与えてしまうことも明らかになった。2007年12月の1度目の航空機実験では、上に挙げた全てのイベントが生じたため、実験ではシングルショットでの最低到達温度を狙うに留まった。これをうけ2度目の航空機実験ではCADRクライオスタットの固有振動数から最適な除振台を選定し、装備した。

3. 振動対策と実験結果

振動対策は低周波と高周波に対し、2種類の除振対策をした。低周波対策として、重量60kgのADRクライオスタットに対し、固有振動数7.5Hz(除振可能周波数は20Hz)をもつ金属除振ばねを用意した(図1)。その結果、1度目の航空機実験で見られた低周波振動によるステージ間の熱短絡は改善され、フライト巡航中は一度も短絡することなく、乱気流中でも正常に動作した。ただし、今回の除振台を用いてもtaxingと離陸時の熱短絡を防ぐことができなかった。今後はケブラーで各シールドを支持して除振率をさらに向上させる予定であ

る。一方、高周波は除振ゴムにより除去することを試みた。高周波振動は主に第2ステージに影響を与えることが分かっているが、除振ゴムにより発熱は1度目の航空機実験巡航時の3分の2に抑制された。これは地上実験の発熱量に比べても20%の増加にとどまった。

4. 今後の展望

今後は低周波除振をより強化し、航空機に特化したCADRの作成を進める。同時に、国際宇宙ステーション暴露部実験に向けて、もしくは地上実験においてもCADRによる100mK固体ヘリウム実験を実現することが次の目標である。周知のようにヘリウムの比熱は極めて大きいため、通常希釈冷凍機などでは1Kポッドで予冷してから、最低温度ステージ(~100mK)にガイドする。CADRに搭載するヘリウム実験セル(17cc)への熱侵入量は約1mW程度あり、これが1Kポッドの要求冷却能力となる。CADRでの1Kポッドは、1Kで連続運転する別のCADRが担う。計算によれば、この1K CADRの低温ステージに100gのGLFを用いれば、およそ3mWの冷却能力を持ち、1Kポッドとしての機能を十分に果たす。1Kから100mKまでは計算上、現CADRで1時間以内に到達できるため、1K ADRの増設により100mK固体ヘリウム実験は可能であると結論できる。

謝辞

本研究は(財)日本宇宙フォーラム宇宙環境利用公募地上研究(次期宇宙利用研究)により、実施されている。

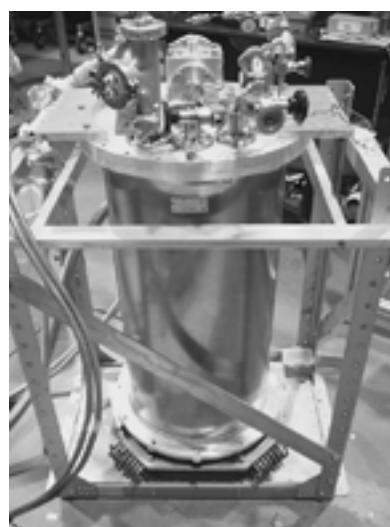


Fig.1 Picture of our CADR cryostat with vibration absorption system at its bottom

参考文献

1. K. Takahashi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 76 (2007) p.139
2. K. Takahashi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.140